



**UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS HIDROLÓGICO Y DISEÑO DE LA RED HIDROMETEOROLÓGICA
EN CUENCAS DE PÁRAMO: CASO DE ESTUDIO DE MOLLETURO Y
CHAUCHA**

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

AUTORAS:

DIANA CATALINA ESTRELLA DELGADO

C.I. 1401065543

JUANA VALERIA TORRES LAZO

C.I. 0105755201

DIRECTOR:

ING. CRISTIAN IVÁN COELLO GRANDA MSc.

C.I. 0103373130

CUENCA – ECUADOR

OCTUBRE 2017



Resumen

El páramo andino es un ecosistema valioso pues alberga fuentes importantes de agua, destinadas principalmente para el consumo humano. Pero además, es muy frágil, por lo que cualquier factor externo puede alterar su equilibrio. A pesar de estas condiciones, la falta de información hidrometeorológica, especialmente en cuencas pequeñas, continúa siendo una limitante para la toma de decisiones. El objetivo de esta investigación fue realizar un estudio de las principales características hidrometeorológicas de la microcuenca del río El Chorro y diseñar una red básica de monitoreo adaptable a la zona que sirva para investigaciones futuras. Para ello, se emplearon datos históricos de precipitación, temperatura y niveles de 18 estaciones cercanas a la microcuenca de estudio. Luego de un control de calidad de la información, se realizó un análisis hidrometeorológico mediante mapas de isolíneas y se aplicaron métodos sencillos para obtener los caudales característicos: medios, base, ecológico, mínimo y máximo. Además, se emplearon criterios técnicos para la ubicación de las estaciones de medición y la selección de estructuras hidráulicas. Los resultados fueron una precipitación uniforme de 1070 mm y una temperatura variable de 4 a 15 °C, debido a la gran diferencia altitudinal. La microcuenca posee un recurso hídrico considerable y poco variable, con un caudal medio de 0.370 m³/s. La red de monitoreo propuesta consta de 2 estaciones pluviográficas, 2 climatológicas y 4 canales Parshall. Finalmente, la información de esta red abre el camino para futuros estudios que permitirán dar un manejo integrado de microcuencas y fuentes hídricas en el páramo.

Palabras clave: Red hidrometeorológica, páramo, análisis hidrológico, cuenca hidrográfica, río El Chorro



Abstract

The Andean Paramo is a valuable ecosystem because it has important water sources used mainly to human consumption. But, it is very vulnerable; therefore, any external factor can disturb its balance. Despite of these characteristics, the lack of hydrometeorological information, especially in small basins, is a limitation to make decisions. The objective of this investigation was to conduct a study about the most important hydrometeorological characteristics of El Chorro river basin and to design a basic monitoring network, which will serve to future researches. For that purpose, historical data of rainfall, temperature and water levels of 18 gaging stations near the study zone were used. After making a data quality control, a hydrometeorological analysis through contours maps was made; in addition, simple methods were used to get typical flows: medium, base, ecological, minimum and maximum. Furthermore, technical criteria were taken into account to locate the gaging stations and to select the hydraulic structures. The results were an uniform rainfall of 1070 mm and variable temperature of 4 to 15 °C, due to high altitudinal range. This basin has a considerable and little variable water resource with a medium flow of 0.370 m³/s. The proposed monitoring network consist of 8 gaging stations: 2 pluviographic stations, 2 climatological stations and 4 Parshall flumes. Finally, the information of this network opens the way to future studies that will allow to give an integrated management of microbasins and water sources in the Paramo.

Keywords: Hydrometeorological network, Paramo, hydrological analysis, hidrografic basin, El Chorro river



Contenido

Resumen.....	2
Abstract.....	3
Capítulo 1: Introducción	15
1.1. Antecedentes	15
1.2. Justificación.....	17
1.3. Estado del arte	19
1.4. Marco teórico	21
1.5. Metodología	23
1.6. Objetivos	24
1.6.1. Objetivo general.....	24
1.6.2. Objetivos específicos	25
Capítulo 2: Materiales y Métodos	26
2.1. Características de la zona de estudio.....	26
2.1.1. Ubicación y delimitación de la microcuenca	26
2.1.2. Cobertura del suelo	26
2.1.3. Geología y geomorfología	27
2.1.4. Tipos de suelo	27
2.1.5. Hidrografía.....	27
2.2. Materiales	29
2.2.1. Información de estaciones hidrometeorológicas.....	29
2.2.2. Aforos	32
2.2.3. Cartografía disponible.....	32
2.2.4. Software utilizados.....	33
2.3. Métodos.....	33
2.3.1. Obtención de parámetros morfométricos e índices hidrológicos.....	33
2.3.2. Control de calidad de la información recopilada	37
2.3.3. Procesamiento de la información.....	40
2.3.4. Análisis regional de las precipitaciones y temperatura.....	44
2.3.5. Cálculo de caudales de la microcuenca del río El Chorro	46
2.3.6. Análisis hidrológico de la microcuenca del río El Chorro.....	49
2.3.7. Diseño de la red hidrometeorológica	57



Capítulo 3: Resultados y discusión.....	64
3.1. Parámetros morfométricos e índices hidrológicos	64
3.2. Control de calidad de la información recopilada	65
3.2.1. Diagramas de caja de las precipitaciones anuales.....	65
3.2.2. Identificación de outliers mediante el método de Tukey	66
3.3. Procesamiento de la información	67
3.3.1. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov	67
3.3.2. Precipitaciones máximas diarias	69
3.3.3. Curvas IDF para la estación Labrado.....	69
3.4. Análisis regional de las precipitaciones y temperaturas.....	71
3.4.1. Variación espacial y temporal de la precipitación	71
3.4.2. Variación espacial y temporal de la temperatura	74
3.5. Caudales de la microcuenca del río El Chorro	78
3.5.1. Serie de niveles corregida de la estación Migüir D.J. Luspa	78
3.5.2. Curva de descarga de la microcuenca del río Migüir	79
3.5.3. Transposición de caudales	80
3.6. Análisis hidrológico de la microcuenca del río El Chorro	82
3.6.1. Precipitación y temperatura promedio	82
3.6.2. Hietograma de diseño	84
3.6.3. Caudal base, mínimo y medio.....	85
3.6.4. Caudal ecológico.....	87
3.6.5. Caudal máximo de diseño	88
3.7. Diseño de la red hidrometeorológica	90
3.7.1. Ubicación de estaciones hidrológicas y climatológicas.....	91
3.7.2. Ubicación y diseño de estructuras hidráulicas	91
3.7.3. Mapa de la red hidrometeorológica	97
3.7.4. Recomendación de equipos de medición	99
Capítulo 4: Conclusiones y recomendaciones	101
Referencias Bibliográficas.....	104
Anexos	108



Índice de Figuras

Figura 1.1 Ilustraciones de la flora y fauna característica de las zonas de páramo	16
Figura 2.1 Localización de la microcuenca de estudio	28
Figura 2.2 Mapa de ubicación de las estaciones	31
Figura 2.3 Esquema de un diagrama de caja o box-plot.....	38
Figura 2.4 Esquema de un diagrama de caja y el método de Tukey.....	39
Figura 2.5 Función de densidad y de distribución acumulativa de Gumbel	41
Figura 2.6 Funciones de densidad de probabilidad Normal para distintos valores de μ y σ^2	42
Figura 2.7 Curvas IDF para lluvia máxima	44
Figura 2.8 Curva de descarga típica.....	47
Figura 2.9 Formas típicas de la curva de duración de caudales.....	51
Figura 2.10 Esquema de la precipitación efectiva y su equivalente en escorrentía directa	54
Figura 2.11 Hietograma de precipitación efectiva y su equivalente en el hidrograma triangular unitario	55
Figura 2.12 Hietograma de precipitación efectiva y su equivalente en el hidrograma de escorrentía directa.....	56
Figura 2.13 Vista en planta y perfil de un canal Parshall	60
Figura 3.1 Diagrama de caja anuales de las estaciones meteorológicas usadas en el estudio	65
Figura 3.2 Diagramas de caja y posibles outliers de las precipitaciones máximas 24 horas	66
Figura 3.3 Curvas IDF para periodos de retorno de 5, 10, 15, 25 y 50 años de la estación Labrado.	70
Figura 3.4 Precipitación media anual para la región	72
Figura 3.5 Variación mensual de la precipitación en las diferentes estaciones meteorológicas .	73
Figura 3.6 Diagrama de correlación de la temperatura vs elevación de cinco estaciones con información de temperatura.	75
Figura 3.7 Mapa de isotermas de la temperatura anual para la región de estudio.	76
Figura 3.8 Variación mensual de la temperatura de cinco estaciones usadas en el estudio	77
Figura 3.9 Serie de niveles original (azul) y corregida (rojo) de la estación Migüir D.J. Luspa.	78
Figura 3.10 Ecuación y curva de descarga del río Migüir.	80
Figura 3.11 Delimitación de la microcuenca del río Migüir.....	81



Figura 3.12	Hidrograma de los caudales medios diarios del río El Chorro.....	82
Figura 3.13	Isolíneas: (a) Precipitación media anual y (b) Precipitación máxima para $T_r=25$ años para el río El Chorro.	83
Figura 3.14	Temperatura media anual para el río El Chorro.	83
Figura 3.15	Hietograma de lluvia máxima de 1.5 horas de duración, en intervalos de 5 minutos, para $T=25$ años, de la microcuenca del río El Chorro	85
Figura 3.16	Curva de duración de caudales de la microcuenca del río El Chorro.....	86
Figura 3.17	Caudal ecológico mensual de la microcuenca del río El Chorro	88
Figura 3.18	Hietograma de precipitación efectiva e hidrograma de crecida para el periodo de retorno de 25 años, de la microcuenca del río El Chorro (El Chorro A.J. Migüir)	90
Figura 3.19	Delimitación de las microcuencas dentro de la región del río El Chorro donde estarán ubicadas las estructuras de control	92
Figura 3.20	Hietograma de precipitación efectiva e hidrograma de crecida para el periodo de retorno de 25 años, en Blanco A.J. El Chorro (a), El Chorro D.J. Yantahuaycu (b) y El Chorro D.J. Taruga Pamba (c)	94
Figura 3.21	Esquema general del canal Parshall.	96
Figura 3.22	Mapa de la red hidrometeorológica para el monitoreo de la microcuenca del río El Chorro	98
Figura 3.23	Estación meteorológica Davis	99
Figura 3.24	Pluviógrafo HOBO	100
Figura 3.25	Sensor de presión de tubo ventilado PT2X	100



Índice de Tablas

Tabla 2.1 Descripción de las estaciones usadas en el estudio.....	30
Tabla 2.2 Detalle de la información cartográfica utilizada en el proyecto.	32
Tabla 2.3 Diseños típicos de un canal Parshall (m)	62
Tabla 2.4 Valores de la garganta (w) y los parámetros k y n para cada rango de caudal	63
Tabla 3.1 Resumen de los parámetros morfométricos e índices hidrológicos de la microcuenca del río El Chorro.	64
Tabla 3.2 Resultado de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov	68
Tabla 3.3 Precipitaciones máximas diarias para 5, 10, 25 y 50 años usando la distribución de probabilidad de Gumbel.....	69
Tabla 3.4 Precipitación promedio anual de las 17 estaciones meteorológicas	71
Tabla 3.5 Precipitaciones promedio mensuales de las estaciones usadas en el estudio.....	74
Tabla 3.6 Temperatura promedio anual y elevación de cinco estaciones con información de temperatura	74
Tabla 3.7 Temperatura promedio mensual de cinco estaciones usadas en el estudio.....	77
Tabla 3.8 Resultados de los aforos realizados por ETAPA EP..	79
Tabla 3.9 Datos utilizados para la obtención de la curva de descarga.....	79
Tabla 3.10 Características morfométricas de la microcuenca del río Migüir.	81
Tabla 3.11 Precipitación cada 5 minutos, para una duración de 1.5 horas y periodo de retorno de 25 años de la microcuenca del río El Chorro	84
Tabla 3.12 Frecuencia absoluta y relativa acumulada para los diferentes intervalos de caudal ..	86
Tabla 3.13 Caudales mensuales, promedio y ecológico de la microcuenca del río El Chorro	87
Tabla 3.14 Cálculo del número de curva (NC) para la microcuenca del río El Chorro.....	89
Tabla 3.15 Cálculo del número de curva (NC) para las microcuencas donde estarán ubicados los canales.....	93
Tabla 3.16 Caudales base y de diseño para las microcuencas del río El Chorro	95
Tabla 3.17 Geometría de los canales Parshall para cada microcuenca y su ecuación de calibración	96
Tabla 3.18 Ubicación de las estaciones de monitoreo propuestas.	97
Tabla 3.19 Ubicación de los canales Parshall	97



Universidad de Cuenca

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Diana Catalina Estrella Delgado en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **“ANÁLISIS HIDROLÓGICO Y DISEÑO DE LA RED HIDROMETEOROLÓGICA EN CUENCAS DE PÁRAMO: CASO DE ESTUDIO DE MOLLETURO Y CHAUCHA”**, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, octubre de 2017.

Diana Catalina Estrella Delgado

C.I: 1401065543



Juana Valeria Torres Lazo en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **“ANÁLISIS HIDROLÓGICO Y DISEÑO DE LA RED HIDROMETEOROLÓGICA EN CUENCAS DE PÁRAMO: CASO DE ESTUDIO DE MOLLETURO Y CHAUCHA”**, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, octubre de 2017.

Juana Valeria Torres Lazo

C.I: 0105755201



Diana Catalina Estrella Delgado, autora del trabajo de titulación “**ANÁLISIS HIDROLÓGICO Y DISEÑO DE LA RED HIDROMETEOROLÓGICA EN CUENCAS DE PÁRAMO: CASO DE ESTUDIO DE MOLLETURO Y CHAUCHA**”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, octubre de 2017.

Diana Catalina Estrella Delgado

C.I: 1401065543



Juana Valeria Torres Lazo, autora del trabajo de titulación **“ANÁLISIS HIDROLÓGICO Y DISEÑO DE LA RED HIDROMETEOROLÓGICA EN CUENCAS DE PÁRAMO: CASO DE ESTUDIO DE MOLLETURO Y CHAUCHA”**, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, octubre de 2017.

Juana Valeria Torres Lazo

C.I: 0105755201



Agradecimientos

Primeramente, nuestro agradecimiento a Dios por darnos la oportunidad de cumplir con una meta más, a nuestras familias por habernos alentado cada día durante toda nuestra trayectoria estudiantil y nuestro sentido de gratitud al Ing. Cristian Coello por su apoyo durante la elaboración del trabajo de titulación, por habernos brindado su tiempo, su conocimiento y su paciencia.



Dedicatoria

A nuestros padres Manuel y Olimpia, y Carlos y Rosa, quienes nos han enseñado el valor de la perseverancia para no desistir a pesar de los obstáculos. A toda nuestra familia que de una u otra manera nos han incentivado a cumplir con esta meta.

A nuestros amigos y compañeros por todas las experiencias compartidas.

Capítulo 1: Introducción

1.1. Antecedentes

El agua es un recurso natural indispensable para el desarrollo de la vida, es un bien que no se puede sustituir, es frágil y limitado (Rocha, 2011). El agua no sólo es utilizada en la parte doméstica y sanitaria, sino también en la agricultura, industria, proyectos energéticos y aspectos recreativos. Adicionalmente, en la actualidad se ha visto la importancia del agua en el mantenimiento del equilibrio ecológico y para diluir las aguas contaminadas provenientes de todos los usos mencionados anteriormente (Rocha, 2011), los cuales están en aumento por el crecimiento poblacional a nivel mundial. El acceso al agua es un derecho de todos los seres vivos, no solo humanos, y es por ello que es fundamental dar una gestión adecuada y oportuna para distribuirla de manera que todos puedan gozar de ella, tanto ahora, como en el futuro.

Una de las fuentes más representativas de agua proviene del Páramo Andino. Este ecosistema se encuentra en la cordillera de Los Andes y se extiende de forma discontinua especialmente en Venezuela, Colombia y Ecuador, y en menor proporción en Panamá, Costa Rica y al Sur en Perú (Gil, 2012). El Páramo se considera desde el extremo superior de los bosques andinos (aproximadamente a 3500msnm) hasta las nieves perpetuas (aproximadamente a 5000msnm) (Buytaert et al., 2010). Está formado por llanuras y valles de origen glacial, con una diversidad de lagunas, humedales y bosques de vegetación bajas, que se adaptaron a las condiciones climáticas de la zona (Gil, 2012), tales como la presión atmosférica, la alta radiación ultravioleta y el viento (Buytaert et al., 2010).

Los páramos están cubiertos en su mayoría por vegetación endémica, como es el pajonal, también se encuentra almohadillas, rosetas y especies de *Polylepis incana Kunth* y *Polylepis reticulata Kunth* (Figura 1.1) las cuales se desarrollan en las partes más altas (Quichimbo et al., 2012). En los páramos se encuentran diferentes tipos de suelos, los cuales tienen sus respectivos procesos de formación. De acuerdo a Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), los suelos de páramo se clasifican generalmente como andosoles, los cuales están formados por la acumulación de materia orgánica y cenizas volcánicas, que dan origen a los suelos negros.

Además, el clima (frío-húmedo) y la baja presión atmosférica contribuyen a su formación. Los andosoles son suelos fértiles y ayudan en el almacenamiento del agua (Buytaert et al., 2010; FAO, 2006). Los andosoles también se pueden clasificar como andisoles de acuerdo con la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2003). Si estos se desarrollan en zonas con más contenido de agua (saturadas) o en zonas donde se ha registrado poca actividad volcánica se designan como histosoles (Buytaert, 2004); en cambio en zonas con mayor pendiente se pueden encontrar rigosoles (Dercon et al., 1998).

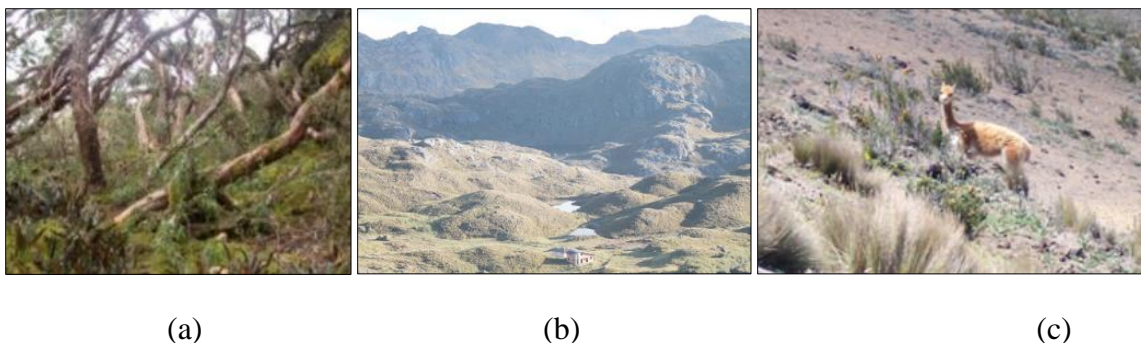


Figura 1.1 Ilustraciones de la flora y fauna característica de las zonas de páramo
(a) Bosque de Polylepis, (b) Ecosistema páramo (c) Especies de animales que habitan en las zonas de páramo

La precipitación fluctúa entre los 700 mm y 3000 mm, teniendo una gran variabilidad espacial y temporal (Balslev & Luteyn, 1992). La variabilidad de las precipitaciones depende principalmente de las características del viento en áreas pequeñas; sin embargo, a mayor escala, la lluvia está influenciada por el gradiente altitudinal y el efecto latitudinal. El viento puede ser fuerte y con dirección variable como resultado de las pendientes pronunciadas. La temperatura está alrededor de 7°C a los 3500 msnm, pero se ve influenciada por la diferencia altitudinal elevada y la radiación solar permanente (Buytaert et al., 2010).

Ecuador tiene la mayor proporción de su área superficial cubierta por páramos, por lo que importantes ciudades como Quito y Cuenca se abastecen de aguas provenientes de este ecosistema. Debido a esto, existen gran cantidad de reservas ecológicas y áreas protegidas como el Parque Nacional Cotopaxi, Parque Nacional Sangay, Reserva Ecológica Ilinizas y el Parque Nacional Cajas, entre otras, con el fin de preservar la integridad de los páramos (Ministerio del Ambiente, 2017).



En la provincia del Azuay, se localiza el Parque Nacional Cajas; específicamente en las parroquias rurales de Sayausí, San Joaquín, Molleturo y Chaucha, del cantón Cuenca. Según el Ministerio del Ambiente, el Parque Nacional Cajas fue declarado como Humedal de Importancia Internacional en el año 2002, debido a que cuenta con alrededor de 786 lagunas que abastecen de agua para las poblaciones cercanas, entre ellas, Cuenca. Debido a los importantes servicios ambientales que provee el páramo y su alta vulnerabilidad, se han creado proyectos que impulsan el pago por la conservación y rehabilitación de cuencas hidrográficas, aunque los mismos aún están en proceso (Cordero, 2008). Dentro de estos proyectos, se encuentra el municipio de Cuenca, mediante la gestión de ETAPA EP.

Muy cercano al Parque Nacional Cajas, se encuentra la zona que será estudiada en este proyecto, específicamente en la microcuenca del río El Chorro, la cual pertenece a la cuenca del río Cañar. De acuerdo a los límites geográficos, la zona se encuentra en las parroquias rurales de Molleturo y Chaucha.

1.2. Justificación

El páramo andino almacena fuentes importantes de agua, destinadas principalmente para el consumo humano, riego, generación hidroeléctrica, aprovechamiento hidráulico e industria; además, permite la regulación del ciclo hidrológico manteniendo un flujo base sostenido a lo largo de todo un año, lo que se atribuye principalmente al clima, la topografía y los suelos característicos de los páramos andinos (Buytaert et al., 2010). Así mismo, en los páramos andinos se desarrolla una gran variedad de fauna y de vegetación endémica las cuales se han adaptado a las extremas condiciones del clima, por lo cual es necesario su preservación.

Por otro lado, la conservación del sistema hidrológico es fundamental ya que el páramo es altamente frágil. La actividad humana afecta directamente en el ciclo del agua pues estas provocan alteraciones en las propiedades del suelo, la vegetación y el clima. Los fenómenos globales como el cambio climático, alteraciones locales del clima causadas por la tala indiscriminada de bosques o la quema de los pajonales, o peor aún la minería, pueden alterar fácilmente su equilibrio (Buytaert et al., 2010). Además, se debe considerar que el cambio de la vegetación endémica del páramo por

vegetación antrópica como el pino, influye significativamente en el ecosistema e implica una disminución en el contenido de agua en las cuencas debido a la evapotranspiración (Buytaert et al., 2010; Célleri et al., 2004). Desafortunadamente, las zonas para el pastoreo, agricultura y plantaciones de pino han incrementado en los últimos tiempos (Crespo et al., 2014; Hofstede et al., 2002). Todas estas alteraciones influyen en la calidad y cantidad de agua que provee al páramo a la población en las zonas bajas.

Sin embargo, a pesar que los páramos andinos son los suministradores de agua, que prestan muchos beneficios hidrológicos a las poblaciones ubicadas en las zonas bajas, se conoce muy poco o nada sobre su hidrología, pues datos meteorológicos e hidrológicos son escasos e incluso la literatura científica disponible es limitada (Buytaert et al., 2010). Esto se debe a que por lo general se realizan monitoreos en cuencas de tamaño grande o mediano (sobre los 50 km²), las cuales son utilizadas en el aprovechamiento hídrico para captaciones o presas, como la cuenca del río Paute. Esto a su vez implica que no se tenga conocimiento sobre el funcionamiento hidrológico de los ecosistemas andinos presentes en microcuencas, impidiendo un manejo adecuado del recurso hídrico y también el desarrollo de la región andina (Célleri et al., 2012).

En Ecuador, mayormente se disponen de registros de precipitaciones y muy pocos caudales registrados (Sandoval & Aguilera, 2015); además, existen escasos estudios en la zona de interés y ninguno de dichos estudios está orientado en las características hidrometeorológicas de la zona. Gran parte se debe a que la mayoría de estudios están enfocados en las cuencas que drenan hacia el Atlántico y dentro de las cuales, se encuentra la mayor zona de páramo. Sin embargo, no se puede descuidar el monitoreo de otras cuencas cercanas al páramo debido a que todas forman un solo ecosistema, donde cualquier alteración puede afectar significativamente a todo el medio.

La falta de información e instrumentos de medición, conducen a utilizar métodos empíricos que en general no son aplicables para las condiciones de páramo (Sandoval & Aguilera, 2015). Esto impide conocer el comportamiento de este ecosistema, y por lo tanto, resulta difícil realizar obras de control y mejora. Aparte de la falta de información hidrometeorológica, la microcuenca del río El Chorro encierra una zona de explotación minera, lo cual evidentemente generará cambios a corto plazo tanto en la flora, fauna, el agua y el suelo. Dichos cambios deberán ser medidos,



analizados y en lo posible mitigados, tomando en cuenta la zona tan frágil e importante en donde se encuentra.

Es por ello que la presente investigación pretende realizar un estudio detallado de las características hidrometeorológicas y principales procesos hidrológicos en la microcuenca del río El Chorro, además de diseñar una red de monitoreo hidrometeorológica que cumpla con criterios técnicos y se adapte a la zona estudiada.

1.3. Estado del arte

En los últimos años ha incrementado la necesidad de estudiar el comportamiento del Páramo Andino, en cuanto a su hidrología, meteorología y usos del suelo; pero adicionalmente, poner énfasis en colocar la gestión de este ecosistema dentro de las políticas gubernamentales. En el año 2006 hasta 2010 se llevó a cabo el Proyecto Páramo Andino, impulsado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), el cual involucra a los principales países con áreas de páramo como Ecuador, Colombia, Perú y Venezuela. Este proyecto llevó a cabo estudios sobre la flora y fauna, el agua, el efecto del cambio del uso del suelo y el cambio climático en los páramos andinos. Como resultado, se ha podido obtener una gran cantidad de información que puede ser usada para nuevos estudios (Cuesta et al., 2014).

A nivel regional, también se ha visto este interés, en especial al sur del Ecuador, donde a partir del año 2010 se ha conformado la Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos (MHEA) promovido por la Universidad de Cuenca (Célleri et al., 2013). Esta iniciativa intenta intercambiar conocimientos entre los grupos de investigación y organizaciones nacionales y regionales, y crear nuevas redes de monitoreo y enlazar las ya existentes. Esto con el fin de incrementar el conocimiento hidrológico y el impacto de las acciones antrópicas en la regulación del ciclo hidrológico (Célleri et al., 2013). Sin embargo, la Universidad de Cuenca ha venido realizando estudios, desde el año 2000, centrados en el cambio del uso del suelo en la hidrología del páramo; ya que, con el paso del tiempo se ha venido ocupando más área de la parte baja del páramo para la agricultura y el pastoreo. Esto claramente afecta el comportamiento del páramo y además aumenta la demanda de agua (Crespo et al., 2014).



Aparte de la poca información que se tiene del páramo, su estudio se vuelve más complejo, dada su gran variabilidad, especialmente en sus características meteorológicas. Como resultado, no se puede asumir las mismas propiedades de una zona hacia otra de condiciones “similares” (Crespo, et al., 2014). Esto obliga a realizar estudios e implantar más zonas de monitoreo para obtener datos representativos. Tal es el caso del estudio realizado para la Evaluación y Optimización de la Red Hidrometeorológica en la Región Nor-Oriental del Ecuador (Villacrés & Gallegos, 2010), con el propósito de analizar y establecer una metodología adecuada para el diseño de una red hidrometeorológica que se adapte a las condiciones tanto físicas, geográficas y climáticas del país.

Además, la conformación de nuevas redes de monitoreo ayuda en la prevención en casos de crecidas e inundaciones. Como referencia se menciona el Diseño de Estaciones Hidrológicas en las subcuencas de los ríos Chone, Portoviejo, Bulubulu y Chongón (Clavijo & Peñaherrera, 2013). También, existen empresas públicas como ETAPA EP que realiza monitoreo continuo a través de su red hidrometeorológica, con el objetivo de conocer la información hidrológica de las cuencas y realizar un manejo adecuado del agua, la cual es utilizada para el abastecimiento de la población de Cuenca. Por otra parte, también se tiene el interés de distintas Universidades por la conservación y manejo sustentable de los recursos hídricos, como es el PROMAS Universidad de Cuenca, el cual cuenta con su propia red de monitoreo en las provincias de Azuay, Cañar y Chimborazo.

El obtener datos representativos sirve también para generar modelos matemáticos fiables. Dichos modelos intentan simular el comportamiento hidrológico de un entorno. En los últimos años, muchos modelos se han desarrollado. Uno de los principales investigadores de la modelación hidrológica a nivel mundial es Keith Beven, quien ha estudiado la teoría de la modelación, creando modelos para predecir no solo la escorrentía generada por una lluvia, sino también para modelar inundaciones, la calidad del agua, recarga de agua subterránea y transporte de sedimentos. Uno de los modelos creados por Beven es el modelo lluvia-escorrentía TOP MODEL y el método de GLUE para estimar la incertidumbre de modelos (Lancaster University, 2017). En la microcuenca Huagrahuma, dentro de la cuenca del río Machángara, ha sido aplicado el modelo TOP MODEL con resultados aceptables (Buytaert et al., 2003). Este modelo también se ha usado para predecir el comportamiento de cuencas no calibradas (Marianza y Soroche) usando datos de cuencas con similares características (Huagrahuma), y al mismo tiempo, dar a conocer sus limitaciones



(Buytaert & Beven, 2009). Similares modelos han sido desarrollados en varias cuencas del río Paute, Jubones, Bulubulu y Zamora para simular la escorrentía, evaluando su desempeño mediante GLUE (Crespo et al., 2012).

Como ya se ha mencionado, la variabilidad espacio-temporal es importante en los páramos andinos, y es necesario determinar dicha variabilidad para generar modelaciones confiables. En la cuenca del río Tomebamba se ha estudiado esta característica en un rango altitudinal de 2600 a 4000 msnm (Tapia, 2016). Otros trabajos como la determinación de las curvas IDF se han desarrollado en la cuenca media alta del río Paute (Estrella, 2016).

Como se expone, la mayor parte de estudios se han realizado a escala de cuencas o de las principales microcuencas, quedando relegadas otras zonas que pueden ser de importancia. En la zona de estudio, se han realizado principalmente investigaciones centradas en las afecciones a la hidrología y propiedades de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal (Crespo et al., 2014) y (Quichimbo et al., 2016).

1.4. Marco teórico

El estudio hidrológico y el monitoreo de cuencas hidrográficas engloban conceptos importantes tanto de la estadística como de la hidrología. Es así que resulta imprescindible dar una pauta de los términos comúnmente utilizados. Una cuenca hidrográfica es una unidad hidrológica a través de la cual se escurre el agua precipitada hasta llegar al único punto de salida que puede ser un río, el mar o un punto determinado (Aguirre, 2007; FAO, 2017). Para conocer la respuesta hidrológica de una cuenca es necesario realizar un análisis tanto espacial y temporal de las variables meteorológicas. Sin embargo, este análisis requiere de un control de calidad preliminar de la información. Esta actividad se enfoca en realizar un análisis de la información con el objetivo de detectar y corregir errores y resulta indispensable ya que influye en los resultados de la investigación. A partir de la información validada, se realiza el análisis estadístico de los datos con el objetivo de determinar patrones de comportamiento de las variables y poder realizar predicciones.



La información hidrometeorológica se recopila mediante redes de monitoreo. El monitoreo hace referencia a las tareas de observar, medir y evaluar de manera continua los fenómenos medio ambientales, y a partir de esto realizar trabajos de control y prevención (OMM & UNESCO, 2013). A su vez, una red de monitoreo es un conjunto de estaciones de medición instalados en una cuenca o en una zona específica de interés. Dichas estaciones están distribuidas espacialmente para la medición sistemática de las variables y de esta manera evaluar el comportamiento de las mismas (OMM & UNESCO, 2013). El objetivo de estas redes es mejorar la calidad y la disponibilidad de la información hidrometeorológica, de manera que se pueda contar con una base de datos segura, confiable y accesible, y que pueda ser utilizada en el manejo de los recursos hídricos. Por otro lado, el monitoreo eficiente está ligado al diseño de redes de monitoreo. El diseño implica tener un conocimiento hidrológico de la zona para la cual se pretende diseñar la red, para obtener resultados positivos. Además, en el diseño se debe establecer qué variables se van a monitorear, el lugar, la frecuencia, la duración y la precisión de las observaciones (Célleri et al., 2013; OMM, 2011).

Una red de monitoreo puede estar conformada por estaciones meteorológicas e hidrológicas. Una estación meteorológica mide y registra regularmente diversas variables meteorológicas como la temperatura, la precipitación, la humedad, la radiación solar, entre otras. Estas estaciones pueden ser convencionales o automáticas y se clasifican en sinópticas, climatológicas, agro meteorológicas, aeronáuticas, aerológicas y pluviométricas. En cambio, una estación hidrológica mide y registra el nivel de agua, caudal y la temperatura del agua (INAMHI, 2015b). Una estación pluviográfica registra la precipitación mediante un pluviógrafo, este equipo es similar al pluviómetro con la diferencia que registra los datos en forma continua y grafica las alturas de las precipitaciones en un periodo determinado (INAMHI, 2015a). En cambio, una estación climatológica registra datos de factores climatológicos como la heliofanía, temperatura, presión, viento, humedad y precipitación (INAMHI, 2015b). Por último, los sensores de nivel son instrumentos electrónicos utilizados para la medición y registro continuo del nivel de agua, los cuales se instalan en las estructuras hidráulicas. Los equipos de monitoreo, la calidad, la precisión y la frecuencia de la toma de datos depende de los objetivos planteados para el monitoreo y de las condiciones de la zona en la cual se ubicarán (Célleri et al., 2013).



Es así que, dependiendo del objetivo del proyecto o investigación, de la magnitud de la cuenca y de la variabilidad espacial de las variables se diseñan redes básicas o redes mínimas. Una red básica se establece con el objetivo de brindar información necesaria para la toma de decisiones no previstas en el futuro con respecto a los recursos hídricos, ya que el comportamiento de las variables es muy impredecible (OMM, 2011). Esta red debe proporcionar información confiable para cualquier lugar de su región de estudio, y de esta manera evitar tomar decisiones erróneas. Una red básica debe ajustarse de manera continua, de forma tal que permita desarrollar y establecer relaciones de las variables en zonas no monitoreadas y así obtener un nivel de información adecuado. En ciertos casos la cantidad de estaciones que conforman la red básica incrementa. Además, se debe considerar el aspecto tanto económico como técnico para el diseño de las redes (OMM, 2011).

Por otro lado, una red mínima está conformada por un mínimo número de estaciones, necesarias para la gestión económica de los recursos hídricos. Esta red evita falencias en el desarrollo y explotación de los recursos a escala general y plantea la iniciativa de que en el futuro pueda expandirse para obtener resultados específicos, ya que, con una red de estructura mínima, no se pueden obtener resultados a detalle de los recursos monitoreados. Por otro lado, una vez que se cuenta con una red mínima, se pueden expresar relaciones de las variables regionalizadas, procesar e interpretar la información y los modelos matemáticos resultantes, para estimar las características de las variables a escala hidrológica general (OMM, 2011).

1.5. Metodología

Para el estudio del comportamiento hidrometeorológico en la microcuenca del río El Chorro, se realizará un análisis previo de las precipitaciones y temperaturas de la región, para definir zonas con características hidrológicas uniformes. Para ello se emplearán series históricas de precipitación y temperatura, debidamente validadas, obtenidas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca (ETAPA EP) y el Programa para el Manejo del Agua y el Suelo (PROMAS Universidad de Cuenca).



La precipitación máxima diaria se determinará de acuerdo a los registros obtenidos del INAMHI de los anuarios meteorológicos de cada año, para el caso de las estaciones obtenidas del INAMHI, y mediante un análisis propio de las estaciones de ETAPA EP Y PROMAS Universidad de Cuenca. La variabilidad espacial y temporal de la precipitación y la temperatura se caracterizará mediante la elaboración de diagramas de correlación y mapas de isolíneas (isoyetas, isotermas), usando las series recopiladas.

Para realizar el estudio hidrológico, que comprende la determinación de caudales característicos, se emplearán registros de precipitación y niveles de estaciones cercanas a la microcuenca del río El Chorro. Los niveles serán transformados a caudales en base a aforos proporcionados por ETAPA-EP y empleando el método de Transposición de Caudales. Se emplearán métodos sencillos para la determinación de los caudales máximos diarios (Soil Conservation Service (SCS)), caudal mínimo (mínimo de la serie), caudal base (Curva de duración de caudales) y caudal ecológico (10% caudal medio mensual), determinando con ello el régimen de caudales de la microcuenca.

El estudio hidrológico servirá para el diseño de la red hidrometeorológica de monitoreo. El diseño se basará principalmente en la aplicación de criterios técnicos establecidos en la Guía de la Organización Mundial de Meteorología (OMM). Entre los cuales considera la representatividad espacial y temporal de la precipitación, las redes actuales existentes, localización, accesos, red fluvial, condiciones socio-económicas y culturales.

Finalmente, el diseño de la red hidrometeorológica incluirá la recomendación de equipos a instalar como pluviógrafos, y el diseño de estructuras hidráulicas, como vertederos o canales, los cuales serán ubicados en puntos estratégicos.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Caracterizar el comportamiento hidrológico y diseñar la red hidrometeorológica en la microcuenca del río Chorro.



1.6.2. Objetivos específicos

- Recopilar, validar y procesar series de información hidrometeorológica de estaciones cercanas a la zona de estudio.
- Analizar las precipitaciones y temperaturas de la región, en base a la información recopilada.
- Realizar un análisis hidrológico de la microcuenca de interés y determinar los caudales característicos: medios, máximo, mínimo, base y ecológico.
- Diseñar la red hidrometeorológica aplicando criterios técnicos y definir las características de las estructuras hidráulicas y equipos de medición requeridos para un monitoreo investigativo.

Capítulo 2: Materiales y Métodos

2.1. Características de la zona de estudio

2.1.1. Ubicación y delimitación de la microcuenca

En la presente investigación se estudió la microcuenca hidrográfica perteneciente al río El Chorro, la cual está conformada por varias quebradas entre ellas la del río Blanco. El río El Chorro drena sus aguas hacia el río Migüir y este a su vez hacia el río Norcay. Este último es un afluente del río Cañar, el cual desemboca en el océano Pacífico. De acuerdo a los límites geográficos, la zona pertenece a las parroquias rurales de Molleturo y Chaucha del cantón Cuenca de la provincia del Azuay. Se encuentra ubicado dentro de las coordenadas UTM en la parte más alta 685487 E 9685300 N y en la parte más baja en unión con el río Migüir 680728 E 9693230 N. Además, esta microcuenca se encuentra próxima al área protegida del Parque Nacional Cajas.

La delimitación del área de drenaje del río El Chorro se realizó utilizando el software ArcGIS 10.4, con el comando “Straight Segment” para generar el polígono siguiendo la divisoria de aguas de la microcuenca. En la Figura 2.1 se muestra la ubicación y delimitación de la microcuenca.

2.1.2. Cobertura del suelo

En base al mapa de usos del suelo del SIGTIERRAS (ver Anexo 2.1), la microcuenca del río El Chorro y sus alrededores está cubierta principalmente por páramo (mayor al 65%), vegetación herbácea y arbustos, y afloramientos rocosos especialmente en la parte alta de la microcuenca. Además, existen pequeñas zonas con pastizales usadas para la alimentación del ganado bovino. La mayor parte del páramo se encuentra protegido a excepción de un pequeño porcentaje usado para pastoreo ocasional.

2.1.3. Geología y geomorfología

De acuerdo al mapa de geomorfología obtenido del SIGTIERRAS (ver Anexo 2.2), la microcuenca del río El Chorro está asentada en su mayoría sobre la Formación Tarqui (> 75%), pero también está constituida por la Formación Macuchi en la parte más baja de la microcuenca, depósitos glaciares y de ladera. Las pendientes de la zona varían de fuertes a muy fuertes (40-70%); es por ello que la diferencia altitudinal es considerable.

2.1.4. Tipos de suelo

Los tipos de suelos predominantes son los Andosoles y los Inceptisoles, más conocidos por Cambisoles según la FAO (ver Anexo 2.3).

Los Andosoles son propios de regiones volcánicas, están formados por materiales volcánicos como cenizas, toba y piedra pómez, además de otros materiales ricos en silicatos. Los Andosoles son suelos fértiles y tienen una gran capacidad de retención de agua (FAO, 2006).

Los Cambisoles son frecuentes en zonas que fueron influenciadas por las glaciaciones durante el Pleistoceno y están formados por partículas finas de texturas variadas provenientes de una amplia gama de rocas. Se caracterizan por tener un bajo contenido de arcilla, materia orgánica, aluminio y/o hierro. Adicionalmente, estos suelos son empleados en la agricultura por ser altamente productivos (FAO, 2006).

2.1.5. Hidrografía

La red hidrográfica de la microcuenca del río El Chorro está conformada por varios cuerpos de agua como las lagunas Yantahuaycu y Santa Huaycu, y por las quebradas Yantahuaycu, Taruga Pamba, Cruz Huaycu, río Blanco y varias quebradas perennes.

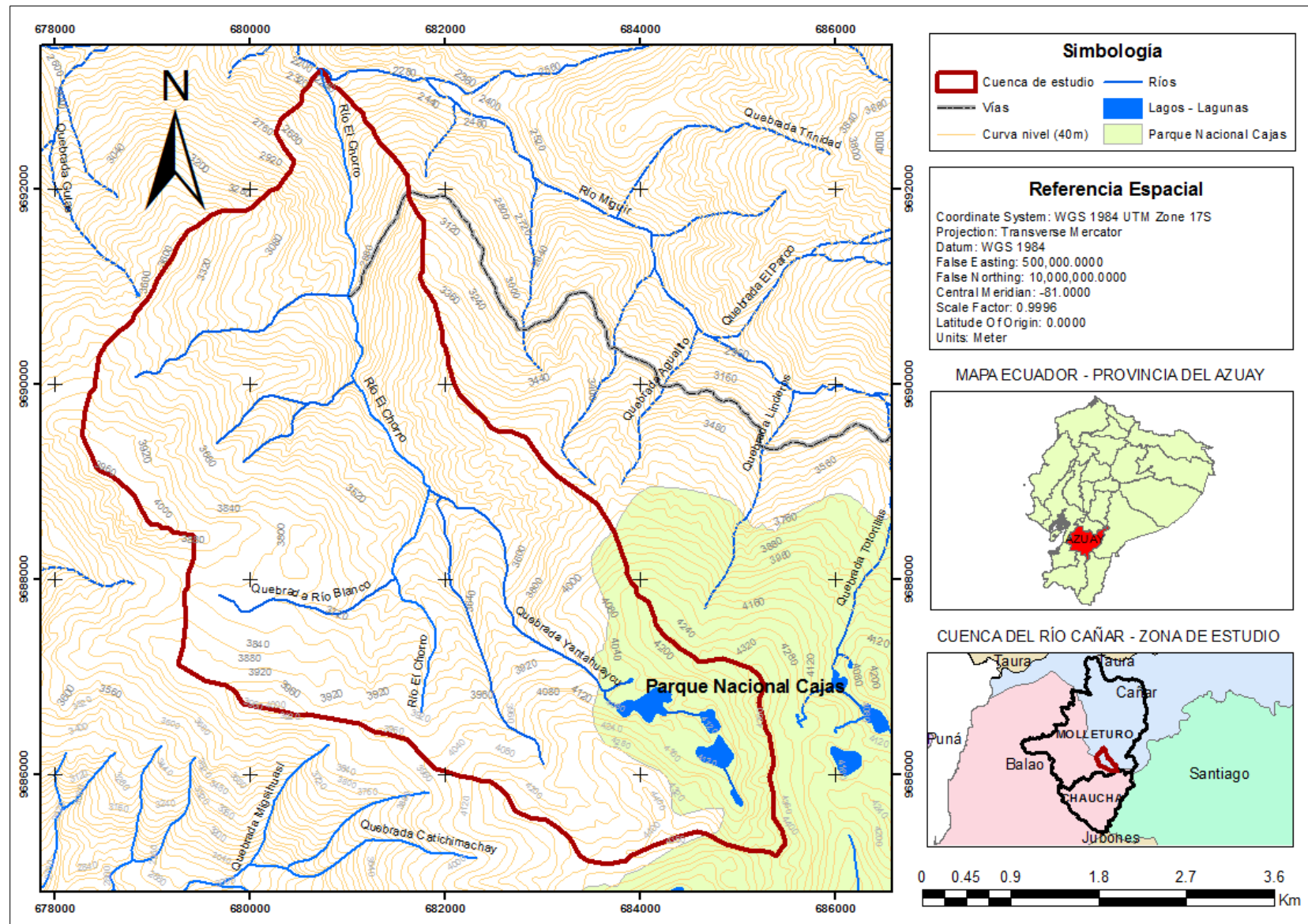


Figura 2.1 Localización de la microcuenca de estudio, geográficamente y a nivel de cuencas hidrográficas

2.2. Materiales

2.2.1. Información de estaciones hidrometeorológicas

Debido a que dentro de la microcuenca de El Chorro no se disponen de registros hidrometeorológicos, fue necesario recopilar información de estaciones cercanas a esta microcuenca, para mediante un análisis regional interpolar y caracterizar el comportamiento de las precipitaciones y temperaturas. Para ello se seleccionaron 18 estaciones de monitoreo debido a que se encuentran más próximas a la zona de estudio y la información, así como los periodos de la serie de datos disponibles son aceptables.

La información hidrometeorológica fue suministrada por entidades tanto públicas como privadas que trabajan en temas relacionados al agua y al suelo como son INAMHI, ETAPA EP y PROMAS Universidad de Cuenca. Del total de estaciones, 6 pertenecen al INAMHI, 8 pertenecen a ETAPA EP y 4 son monitoreadas por el PROMAS Universidad de Cuenca. En cuanto al tipo de estaciones, 3 son climatológicas, 3 pluviométricas, 11 pluviográficas y 1 limnigráfica.

Esta información corresponde a series históricas de precipitación, temperaturas y niveles, discretizados dependiendo la variable meteorológica y la entidad propietaria. Los datos de precipitación recopilados del INAMHI fueron mensuales y máximas 24h; los del PROMAS Universidad de Cuenca fueron horarios y diarios; y los obtenidos de ETAPA EP fueron instantáneos y cada 5 minutos. De la misma manera, los datos de temperatura fueron mensuales, diarios y cada 5 minutos, respectivamente. Finalmente, los datos de niveles se encontraban discretizados cada 5 minutos.

En la Tabla 2.1 se describe información a detalle de las estaciones utilizadas en la presente investigación y en la Figura 2.2 se muestra un mapa con la ubicación de las mismas.



Tabla 2.1 Descripción de las estaciones usadas en el estudio.

Se muestra código, nombre, tipo, coordenadas, periodo y años de la serie de datos, discretización, provincia e institución a la que pertenece.

Nº	Código	Nombre	Tipo	X (m)	Y (m)	Cota (msnm)	Periodo de la serie	# años de la serie	Discretización de los datos	Provincia	Institución propietaria
1	M032	Santa Isabel	CO	687468	9637914	1550	1959-2012	28	Mensual	Azuay	INAMHI
2	M176	Naranjal	CO	656776	9705653	50	1964-2012	26	Mensual	Guayas	INAMHI
3	M419	Girón	PV	705646	9651214	2130	1959-2012	46	Mensual	Azuay	INAMHI
4	M422	Hacienda Santa Lucía	PV	693643	9638149	1310	1968-2006	31	Mensual	Azuay	INAMHI
5	M428	Pedernales	PV	682404	9656414	3450	1977-1985	5	Mensual	Azuay	INAMHI
6	M666	San Fernando INECEL	PG	702988	9649622	2356	1982-1990	9	Mensual	Azuay	INAMHI
7	CH-PG	Chanlud	PG	718864	9703952	3485	2002-2015	13	Instantáneo (0.5mm)	Azuay	ETAPA EP
8	CHI-PG	Chirimichay	PG	703184	9693181	3270	2009-2015	6	Instantáneo (0.5mm)	Azuay	ETAPA EP
9	LA-PG	Labrado	PG	714476	9698558	3426	2002-2014	13	Instantáneo (0.5mm)	Azuay	ETAPA EP
10	PT-PG	Portete	PG	712933	9653428	3174	1997-2015	16	Instantáneo (0.5mm)	Azuay	ETAPA EP
11	YC-PG	Yanuncay en Cancán	PG	695702	9674713	3538	1997-2013	16	Instantáneo (0.5mm)	Azuay	ETAPA EP
12	YP-PG	Yanuncay en Pucán	PG	703600	9674444	3000	1997-2015	16	Instantáneo (0.5mm)	Azuay	ETAPA EP
13	CHA-PG	Chaucha	PG	672548	9679160	1896	2014-2016	2	5 minutos	Azuay	ETAPA EP
14	ML-PG	Migüir D.J. Luspa	LM	691221	9690512	3624	2014-2016	2	5 minutos	Azuay	ETAPA EP
15	IAM-003-PG	Bermejós	PG	696539	9666949	3761	2006-2016	6	Horario	Azuay	PROMAS
16	PRO-011-PG	Marianza Alto Pajonal 2	PG	709221	9684392	3622	2004-2017	9	Horario	Azuay	PROMAS
17	IAM-001-M	Quimsacocha	CO	698423	9663781	3762	2005-2015	8	Diario	Azuay	PROMAS
18	IAM-008-PG	Zhurucay	PG	696800	9660968	3737	2006-2016	5	Diario	Azuay	PROMAS

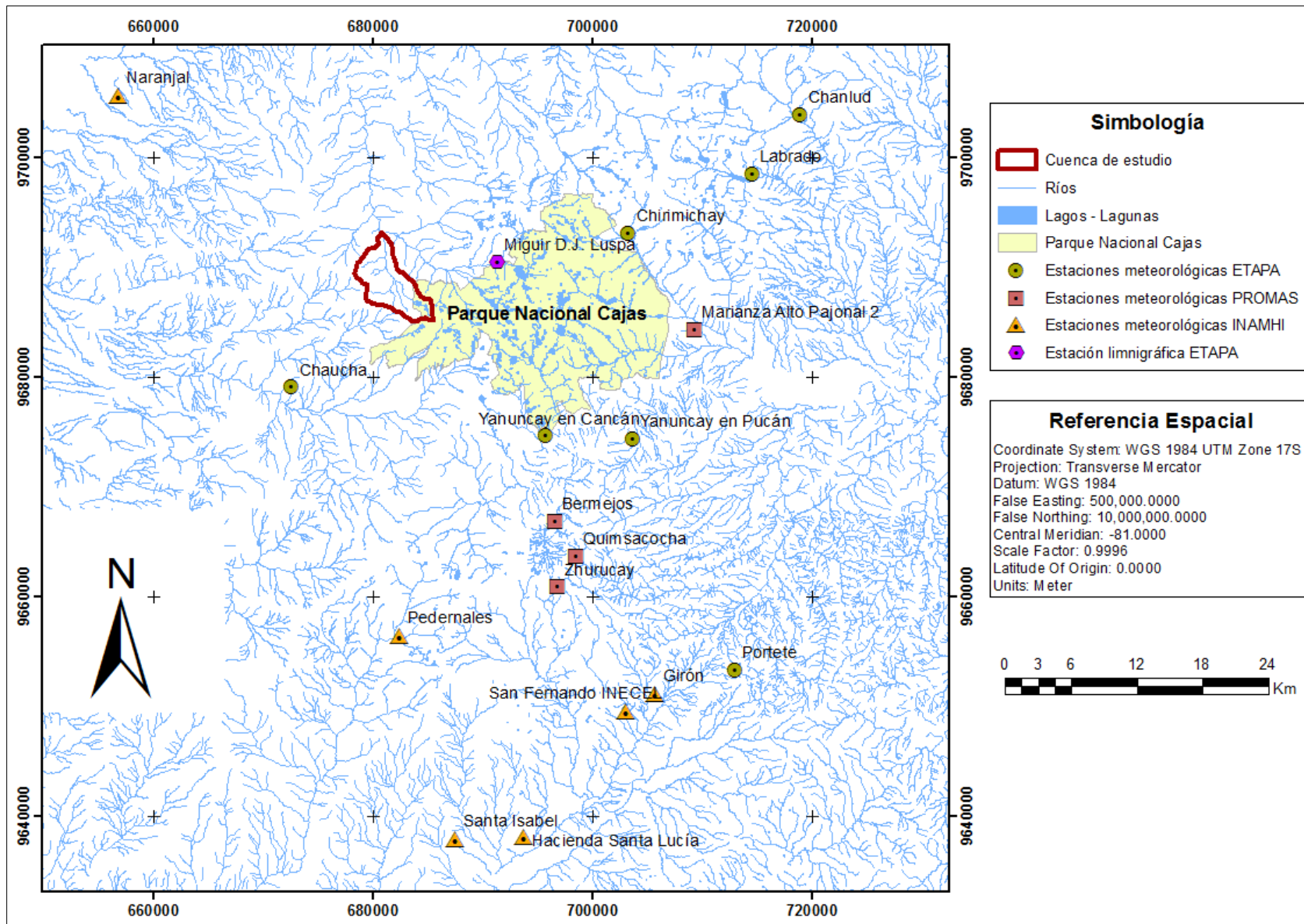


Figura 2.2 Mapa de ubicación de las estaciones obtenidas del INAMHI, ETAPA EP y PROMAS Universidad de Cuenca

2.2.2. Aforos

ETAPA EP dispone de información de aforos realizados en cuencas hidrográficas cercanas a la zona de proyecto, por lo que fue indispensable recopilar dicha información, la cual se utilizó para el análisis hidrológico de la microcuenca del río El Chorro. Dentro de esta información se encuentran dos aforos en la estación Miguir D.J. Luspa y uno en el río El Chorro, los cuales se muestran más adelante.

2.2.3. Cartografía disponible

La información cartográfica utilizada en el estudio fue obtenida de diferentes fuentes de información cartográfica tales como el Instituto Geográfico Militar (IGM), PROMAS Universidad de Cuenca, Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) y del Sistema Nacional de Información de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica (SIGTIERRAS). Para el procesamiento posterior en ARCGIS, se empleó el formato shapefile (shp) y ráster (tiff). Esta información se detalla en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Detalle de la información cartográfica utilizada en el proyecto.

Cartografía	Fuente
Mapa de la división política del Azuay, por cantones y parroquias	INEC
Topografía escala 1:50000 (curvas de nivel cada 40m)	IGM
Modelo Digital de Elevaciones de la región de estudio	USGS
Mapa de ríos del Ecuador escala 1:50000	IGM
Mapa de microcuencas dentro de las parroquias de Molleturo y Chaucha escala 1:100000	PROMAS
Mapa de vías del Ecuador escala 1:100000	IGM
Mapas de cobertura, geología y geomorfología escala 1:50000	SIGTIERRAS

2.2.4. Software utilizados

Para el procesamiento geoespacial de precipitaciones y temperaturas se utilizó el software ArcGIS versión 10.4.1, el cual es un sistema de información geográfica creado por ESRI, que permite el análisis e interpretación de datos. Además, para la determinación de hidrogramas de crecida, se empleó el programa HEC-HMS 4.2.1 desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica de los Estados Unidos para simular el proceso lluvia-escorrentía. Adicionalmente, para la elaboración de planos de las estructuras hidráulicas de control se utilizó el software Autocad 2016, el cual es un programa de diseño asistido por computadora creado por Autodesk. Finalmente, se utilizó el programa de cálculo Excel 2013 para el procesamiento de los datos.

2.3. Métodos

2.3.1. Obtención de parámetros morfométricos e índices hidrológicos

2.3.1.1. Área y perímetro de la microcuenca

El área de drenaje de una cuenca (A) corresponde al área plana, o en proyección horizontal, delimitada por la divisoria de aguas de la cuenca (Aparicio, 1999). El perímetro (P) es la longitud de la línea divisoria de aguas que define el contorno de la cuenca hidrográfica.

Estos dos parámetros se definieron en ARCGIS; se trabajó en la tabla de atributos de la microcuenca de estudio y se utilizó la herramienta “Calculate Geometry”.

2.3.1.2. Longitud del cauce principal

La longitud del cauce principal (L) es la distancia horizontal en metros medida a lo largo del cauce y siguiendo la dirección de drenaje, desde la parte más alta de la cuenca hasta la salida aguas abajo. Para medir esta longitud se utilizó el comando “Measure”.

2.3.1.3. Desnivel altitudinal

El desnivel altitudinal (ΔL) es la diferencia entre la cota más alta y la más baja de la cuenca. Estos valores se determinaron a partir de la topografía disponible.

2.3.1.4. Altitud media

La altitud media de la cuenca (E_m) indica el promedio de las elevaciones presentes en la misma. Para determinarla se utilizó el método área-elevación, el cual consiste en la medición del área entre un par de curvas de nivel limitada por la divisoria de aguas y la elevación promedio para cada par de curvas (Fuentes, 2004). El método está dado por la ecuación 2.1.

$$E_m = \frac{\sum A_i * E_i}{A_t} \quad (2.1)$$

Donde:

E_m = Elevación media de la cuenca (m)

A_i = Área entre cada par de curvas de nivel (m^2)

E_i = Elevación promedio de cada par de curvas de nivel (m^2)

A_t = Área total de la cuenca (m^2)

La elevación media influye en el régimen hidrológico pues se relaciona con las precipitaciones que alimentan al ciclo hidrológico y también con la variación de la temperatura en la cuenca, que permite la existencia de diversos microclimas y hábitats (Aguirre, 2007).

2.3.1.5. Pendiente media

La pendiente media (m) de la cuenca, indica la variación de la elevación con respecto a la distancia a lo largo del flujo principal (Aparicio, 1999).

Para determinar la pendiente media fue necesario disponer de un Modelo Digital de Elevaciones (DEM), un archivo vector (shp) y un archivo ráster de la microcuenca (tiff). Con la información de las curvas de nivel se creó el DEM, luego con este se obtuvo el ráster de la microcuenca. Se creó el mapa de pendientes (en porcentaje) utilizando el archivo ráster con el comando “Slope” y se interpoló dicho mapa con el vector de la microcuenca mediante el comando “Interpolate shape”. Finalmente, con el comando “Zonal Statistics Table” se realizó un promedio estadístico de las pendientes de la microcuenca de estudio para obtener la pendiente media de la microcuenca.

2.3.1.6. Coeficiente de compacidad

El coeficiente de compacidad (K_c) es la relación entre el perímetro de la cuenca y el de un círculo que tenga igual área que la cuenca de estudio (Fuentes, 2004). Está dado por la ecuación 2.2.

$$K_c = 0.282 \times \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2.2)$$

Donde:

K_c = Coeficiente de Compacidad

P = Perímetro de la cuenca (m)

A = Área de la cuenca (m^2)

El valor de K_c generalmente varía entre 1 y 1.75. Si K_c se acerca a la unidad, indica que la cuenca tiene forma más o menos redondeada y existe el riesgo que se produzcan grandes volúmenes de escurrimiento. En contraste, un valor cercano a 1.75 indica que la cuenca tiende a ser alargada y se espera que el volumen de escurrimiento sea menor y además implica un mayor tiempo para el escurrimiento del agua (Fuentes, 2004).

2.3.1.7. Factor de forma

El factor de forma (K_f) indica la relación que existe entre el área de la cuenca (A) y el cuadrado de la longitud del cauce principal (L) (Fuentes, 2004). Está dado por la ecuación 2.3.

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (2.3)$$

Donde:

K_f = Factor de forma de Horton.

A = Área de la cuenca (m^2)

L : Longitud del cauce principal (m)

Este parámetro indica cuán alargada es una cuenca. El valor de K_f varía entre 0 y 1. Si este valor se acerca a la unidad indica que la cuenca tiende a ser achatada y está sujeta a crecientes, caso contrario la cuenca es alargada y es menos propensa a crecientes (Fuentes, 2004).

2.3.1.8. Densidad de drenaje

La densidad de drenaje (D_d) es la longitud total de los cauces existentes dentro de una cuenca hidrográfica, dividida para el área y expresada en km/km² (Londoño, 2001). Está dado por la ecuación 2.4.

$$D_d = \frac{\Sigma l_i}{A} \quad (2.4)$$

Donde:

D_d = Densidad de drenaje (km/km²)

Σl_i = Sumatoria de la longitud de los cauces (km)

A = Área de la cuenca hidrográfica (km²)

La densidad de drenaje permite clasificar a una cuenca como bien o mal drenada. Para valores de D_d cercanos a 0.5 km/km² se considera que la cuenca es pobremente drenada y para valores de D_d hasta 3.55 km/km² se considera bien drenada (Londoño, 2001).

2.3.1.9. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración (T_c) se define como el tiempo máximo que tarda la partícula de agua más alejada en llegar al punto de salida de la cuenca hidrográfica (Chow, Maidment, & Mays, 2000).

Para el cálculo se pueden encontrar varias ecuaciones en la literatura; sin embargo, se seleccionó la ecuación 2.5 dada por Kirpich (1940), ya que es la más ampliamente utilizada y de fácil aplicación.

$$T_c = 0.0195 * \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (2.5)$$

Donde:

T_c = Tiempo de concentración (min)

L = Longitud del cauce principal (m)

H = Desnivel altitudinal de la cuenca (m)

2.3.1.10. Tiempo de retardo

El tiempo de retardo (t_r) se define como el tiempo que transcurre desde el centro de gravedad del hietograma de precipitación efectiva (P_e) hasta el punto máximo del hidrograma (Chow et al., 2000). Está dado por la ecuación 2.6.

$$t_r = 0.6 \times T_c \quad (2.6)$$

Donde:

t_r = Tiempo de retardo (min)

T_c : Tiempo de concentración (min)

2.3.2. Control de calidad de la información recopilada

El procesamiento estadístico de una serie de datos requiere de un análisis preliminar de los mismos, donde se pretende verificar o corregir ciertos errores introducidos en las mediciones o el registro de la información. Realizar este procedimiento previo permite tener mayor confianza en los resultados que se obtengan posteriormente.

En esta investigación se realizaron los siguientes análisis:

- Análisis de las series disponibles.
- Estudio de la dispersión de los datos mediante diagramas de caja (box-plots).
- Identificación de valores extremos (outliers) mediante el método de Tukey.
- Corrección de la serie de niveles de la estación Migüir D.J. Luspa en base a los datos del primer año de la serie.

A continuación, se describen cada uno de ellos:

2.3.2.1. Análisis de las series disponibles

Se revisó la información disponible de cada una de las estaciones escogidas para identificar vacíos en las series o años incompletos. Dichos años no fueron considerados en la media anual.

2.3.2.2. Estudio de la dispersión de los datos mediante diagramas de caja (box-plots)

Los diagramas de caja son gráficos simples que muestran la distribución de los datos respecto a la mediana. Además, permiten identificar rápidamente los valores máximos, mínimos y los

cuartiles. Tiene la ventaja de que es menos sensible a valores extremos o atípicos dado que no emplea la media o la desviación estándar y es por ello que es usado también para identificar outliers (Seo, 2006). En la Figura 2.3 se puede observar la forma del diagrama.

Los diagramas fueron elaborados en el programa Excel 2013, para lo cual se calcularon los valores necesarios: valor máximo y mínimo, mediana, cuartiles 1 y 3 (Q1 y Q3) y el rango intercuartílico (IQR). Se construyeron diagramas para 16 de las 17 estaciones meteorológicas usando las precipitaciones anuales, con el fin de comparar la variación de las mismas. Dicha información se presenta en los Anexos 2.4 y 2.5.

Mediana

La mediana es el valor central o promedio de valores centrales de una serie ordenada de mayor a menor. Se conoce también como cuartil 2 (Q2), ya que el 50% de los datos se encuentran bajo este valor (Montgomery & Runger, 2003).

Cuartil 1 y 3 (Q1 y Q3)

El cuartil 1 es un valor que tiene aproximadamente el 25% de los datos y el cuartil 3 el 75% de los datos, de una serie ordenada de mayor a menor. El rango intercuartílico (IQR) es la diferencia entre estos dos cuartiles y representa la variabilidad del conjunto de datos (Montgomery & Runger, 2003).

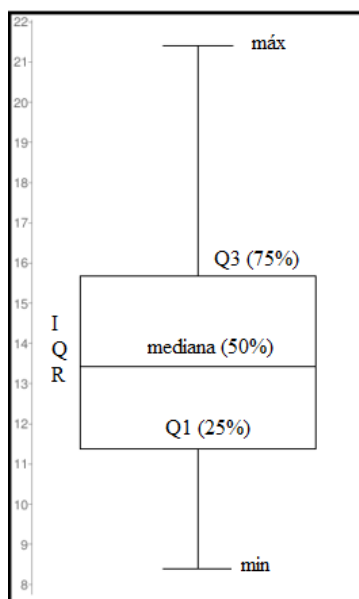


Figura 2.3 Esquema de un diagrama de caja o box-plot

Los outliers o valores atípicos son datos que difieren considerablemente del conjunto de datos y su presencia puede deberse a errores en la medición o a valores extremos nunca antes registrados (Seo, 2006) . En el caso de que el valor sea efectivamente un outlier, los cálculos como la media aritmética cambiarían totalmente, causando un efecto negativo en el análisis de datos. Por el contrario, si no lo es, el dato es vital para el diseño de estructuras y análisis posteriores. Es por ello que estos datos no pueden eliminarse a menos que se realice un estudio riguroso.

- Los primeros límites están a una distancia 1.5 IQR, sobre Q3 o bajo Q1. Los valores que se encuentran dentro de este rango son considerados no outliers (Figura 2.4).
- Los otros límites están a 3 IQR, sobre Q3 o bajo Q1. Los valores que se encuentran entre este límite y el primero son tomados como posibles outliers; por el contrario, si sobrepasan este límite se consideran probables outliers.



El análisis de valores extremos se realizó para 13 de las 17 estaciones meteorológicas empleadas en el estudio y usando las precipitaciones máximas 24 horas (ver Anexo 2.6). Esto se debe a que las estaciones Santa Isabel, Pedernales y San Fernando INECEL no disponen de estos registros en los anuarios del INAMHI. De la misma manera, la estación Chaucha no cuenta con datos suficientes para realizar este análisis.

2.3.2.4. Corrección de la serie de niveles de la estación Migüir D.J. Luspa

Se observó que la serie de niveles instantáneos de la estación Migüir D.J. Luspa tenía una diferencia notoria en los datos, a partir de enero de 2015 y un salto en abril del mismo año. Al graficar el limnigrama correspondiente, estos cambios bruscos fueron fácilmente detectables y permitieron realizar una corrección visual de los mismos. Para ello, se restó un valor especificado de error en la medición y disminuidos en varios intervalos, a fin de obtener una serie más coherente.

2.3.3. Procesamiento de la información

2.3.3.1. Precipitaciones máximas diarias para distintos periodos de retorno

Para caracterizar la zona y elaborar posteriormente las isoyetas, se determinaron las precipitaciones máximas diarias para periodos de retorno de 5, 10, 25 y 50 años. Para el caso de las estaciones del INAMHI, se recopilaron las precipitaciones máximas diarias de los anuarios meteorológicos de cada año. Para las estaciones de ETAPA EP y PROMAS Universidad de Cuenca, se determinaron las lluvias máximas 24 horas mediante una hoja de cálculo. Con esta información, se determinó la bondad de ajuste de las distribuciones de probabilidad Gumbel y Normal mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Posteriormente, se identificó cuál de las dos distribuciones se ajustaba mejor y con ella se proyectaron las precipitaciones máximas 24 horas para los distintos periodos de retorno.

Distribución de probabilidad de Gumbel

La distribución de Gumbel es la más usada en nuestro medio para eventos extremos pues su comportamiento se ajusta bastante a esta distribución. La función de distribución de probabilidad acumulativa de Gumbel está definida por la siguiente ecuación (Aguilera, 2007):

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{(x-\mu)}{\alpha}}} \quad \text{para } -\infty \leq x \leq \infty \quad (2.7)$$

Donde:

x = Variable aleatoria

e = Constante de Neper

μ y α = Constantes que dependen de la media (\bar{x}) y la desviación estándar (s) de los datos.

$$\mu = \bar{x} - 0.45s$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} s$$

$F(x)$ representa la probabilidad de excedencia y puede expresarse en función del periodo de retorno (T) de acuerdo a la ecuación 2.8:

$$F(x) = 1 - \frac{1}{T} \quad (2.8)$$

Despejando de la expresión 2.7, se puede obtener el valor de x

$$x = -\ln(-\ln(F(x))) * \alpha + \mu \quad (2.9)$$

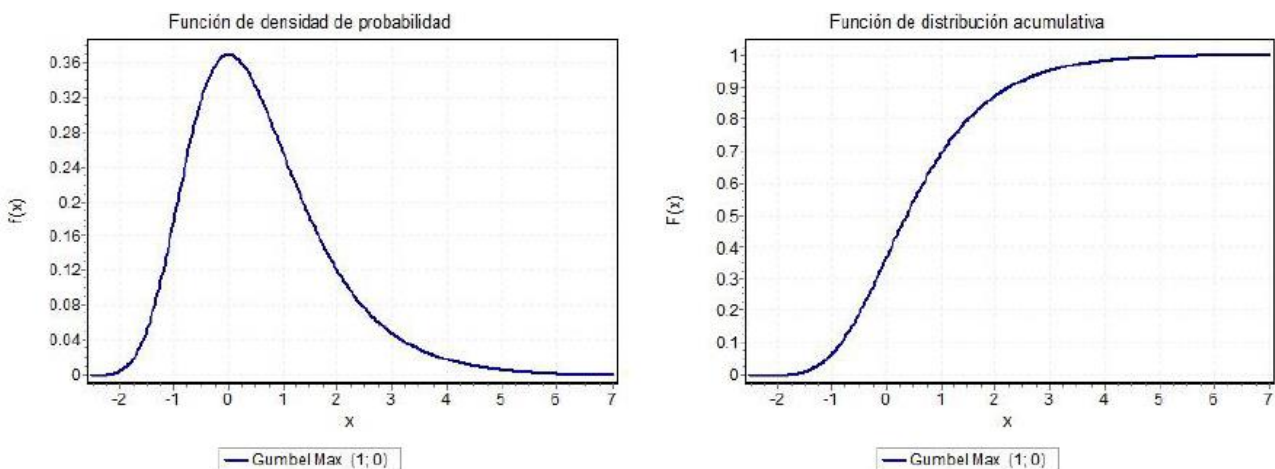


Figura 2.5 Función de densidad y de distribución acumulativa de Gumbel (Ibáñez, 2011)

Distribución de probabilidad Normal

La función de distribución de probabilidad Normal también llamada Distribución Gaussiana, viene dada por la siguiente expresión (Aguilera, 2007):

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (2.10)$$

Donde:

x = Variable aleatoria

μ = Media de la población

σ = Desviación estándar de la población

La expresión anterior puede expresarse de manera más sencilla asignando una variable estandarizada, lo que se conoce como Distribución Normal Estándar.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

$$F(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (2.11)$$

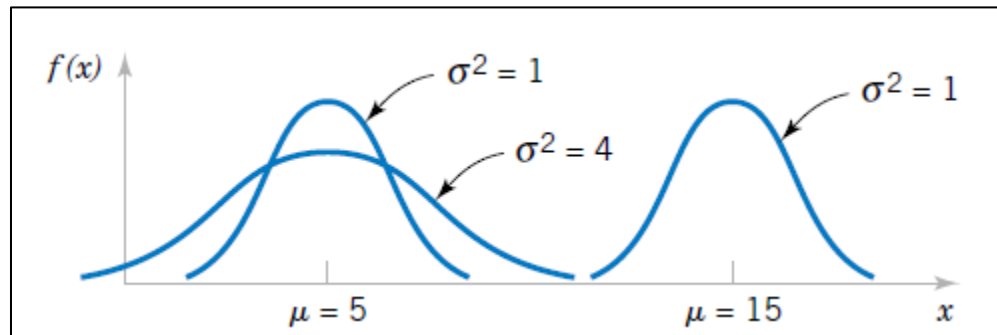


Figura 2.6 Funciones de densidad de probabilidad Normal para distintos valores de μ y σ^2 (Montgomery & Runger, 2003).

Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov

La prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov permite identificar que tan bien se ajusta una muestra a una determinada distribución de probabilidad, y con ello optar por la que de un mejor ajuste.

Para la aplicación de esta prueba se determinó en primer lugar la frecuencia observada acumulada (Aguilera, 2007):

$$F_n(x) = \frac{n}{N+1} \quad (2.12)$$

Donde:

$F_n(x)$ = Frecuencia observada acumulada

n = N° orden del dato

N = N° total de datos

Posteriormente, se calculó la frecuencia teórica acumulada $F(x)$ para cada distribución de probabilidad (Gumbel y Normal). Después, se determinó la diferencia absoluta entre la frecuencia observada y teórica de cada dato (D_N), y la mayor diferencia se comparó con un factor D_α .

El factor D_α depende del número total de datos (N) y del nivel de significación del contraste (α). Estos valores vienen tabulados y se muestran en el Anexo 2.7. Normalmente α se toma igual a 5%, lo que significa una confiabilidad del 95%.

$$D_N = \sup |F_n(x)_i - F(x)_i| \quad (2.13)$$

Si $D_N < D_\alpha$, se acepta el ajuste, caso contrario, se rechaza. En este contexto, se determinó el valor de D_N para cada función y se escogió la que diera el menor valor. Este procedimiento se realizó para cada una de las estaciones.

2.3.3.2. Obtención de las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Dentro de cualquier proyecto o estudio hidrológico, es necesario determinar el evento de diseño, el cual servirá para el dimensionamiento de obras hidráulicas como vertederos, puentes, obras de drenaje, etc. Una forma muy común de hacerlo es mediante las curvas de Intensidad-Duración y Frecuencia. Estas curvas son una representación gráfica de la relación entre la intensidad, duración y frecuencia (periodo de retorno) de un evento (Chow et al., 2000). Por lo tanto, permiten predecir la intensidad del evento que podría ocurrir con una cierta frecuencia, según los datos procesados. En la Figura 2.7 se presenta un esquema de las curvas IDF.

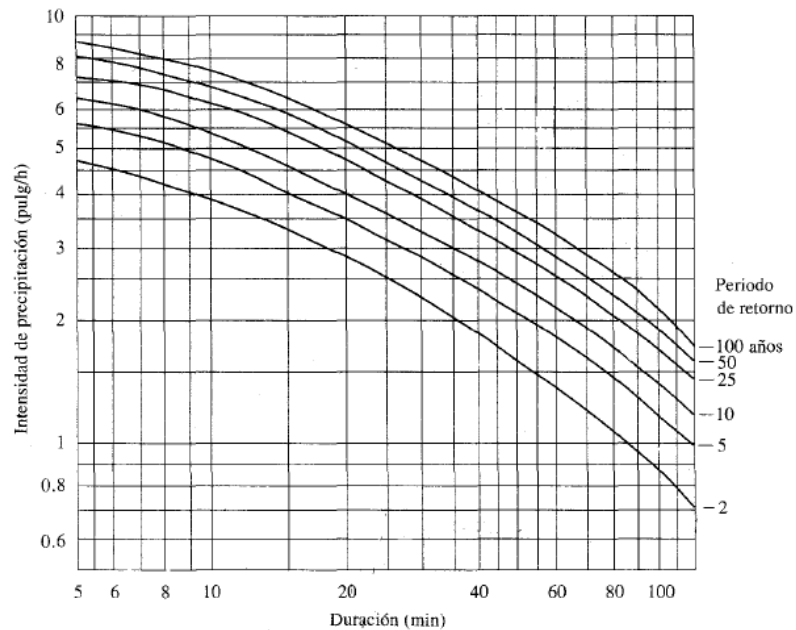


Figura 2.7 Curvas IDF para lluvia máxima (Chow et al., 2000)

Para la obtención de las curvas IDF representativas de la microcuenca de estudio, se seleccionó la estación Labrado, debido a que se encuentra a una cota intermedia respecto a la variación altitudinal de la microcuenca de estudio. Se tomó en cuenta este criterio ya que la precipitación varía con respecto a la altura y su ubicación geográfica. Se procesaron los datos instantáneos del día de mayor precipitación de cada uno de los 13 años de información, para obtener las precipitaciones máximas para duraciones de 5, 10, 15, 20, 30 minutos y 1, 2, 4, 6, 8, 12 y 24 horas. Para cada duración se calcularon las intensidades máximas (mm/h) y mediante la distribución de probabilidad de Gumbel, se obtuvieron las intensidades para periodos de retorno de 5, 10, 15, 25 y 50 años. Nuevamente se usó esta distribución de probabilidad luego de que se comprobó con la prueba de Kolmogorov-Smirnov que se ajustaba satisfactoriamente. Estas curvas fueron usadas para la construcción del hietograma de diseño de la microcuenca.

2.3.4. Análisis regional de las precipitaciones y temperatura

2.3.4.1. Comportamiento espacial y temporal de la precipitación

El comportamiento espacial se caracterizó mediante la elaboración de isoyetas, para lo cual se emplearon las precipitaciones anuales y las precipitaciones máximas 24 horas para periodos

de retorno de 5, 10, 25 y 50 años, de las 17 estaciones meteorológicas. Por otro lado, la variación temporal se determinó mediante un diagrama de correlación de las lluvias mensuales promedio de cada estación.

Elaboración del mapa de isoyetas

Para la elaboración del mapa de isoyetas se utilizaron las precipitaciones y el software ArcGIS. Se seleccionó el método de interpolación de la Distancia Inversa Ponderada (IDW siglas en inglés) de la caja de herramientas “Interpolation” de la extensión Spatial Analyst Tools. El método IDW establece que la variable disminuye conforme la distancia se incrementa desde su punto de ubicación. Se seleccionó este método porque representaba de mejor manera el comportamiento espacial de la precipitación. Para elaborar las isolíneas para la precipitación promedio anual y para los diferentes periodos de retorno se utilizó el comando “Contour”.

2.3.4.2. Comportamiento espacial y temporal de la temperatura

El comportamiento espacial de la temperatura se determinó mediante la construcción de isotermas con los datos de temperatura de 5 estaciones: Santa Isabel, Naranjal, Chaucha, Migüir D.J. Luspa y Quimsacocha. Adicionalmente, mediante un diagrama de correlación de la temperatura vs cota, se obtuvo una ecuación lineal representativa de la variabilidad espacial en la región.

La variabilidad temporal se caracterizó mediante los datos promedio mensual de las 5 estaciones. Con estos datos se realizó el diagrama de correlación respectivo, identificando la variación de la temperatura durante el año.

Elaboración del mapa de isotermas

El mapa de isotermas se elaboró considerando el gradiente altitudinal, ya que la temperatura varía conforme incrementa o disminuye la cota. Se utilizó el software ArcGIS, la información de las temperaturas y el DEM obtenido del USGS. Se determinó el gradiente altitudinal de la ecuación lineal resultante del diagrama de correlación. Con este gradiente se calcularon los nuevos valores de temperatura considerando que se encuentran a una altura determinada. Finalmente, se interpoló (usando el método IDW) los nuevos valores de temperatura con el

DEM para considerar la altitud. Para ello se utilizaron las herramientas “Interpolation” y “Raster Calculator”.

2.3.5. Cálculo de caudales de la microcuenca del río El Chorro

2.3.5.1. Cálculo de caudales a partir de niveles de la microcuenca del río Migüir

Para la obtención de caudales en la microcuenca del río Migüir se contó con la información de los dos aforos realizados por la empresa ETAPA EP en el río Migüir. Además, de una serie de niveles de dos años registrados en la estación limnigráfica Migüir D.J. Luspa, ubicada en el mismo punto de aforo.

Curva de descarga

La curva de descarga o curva de calibración de caudales establece una relación entre el caudal y el nivel de agua. Esta relación se ajusta a una función matemática. Para su construcción, se realizan varios aforos y mediciones de nivel de agua en una sección determinada de un cauce, medidos al menos durante un año hidrológico de manera que se ajusten a la realidad. Dicha curva permite obtener caudales a partir de los niveles, sin la necesidad de realizar aforos (Figura 2.8) (Coello, 2016). La curva de descarga se expresa mediante la ecuación 2.14.

$$Q = K \times (H - H_o)^b \quad (2.14)$$

Donde:

Q = Caudal (m^3/s)

K y b = Parámetros de ajuste

H = Nivel de agua (m)

H_o = Nivel al cual el caudal es cero (m)

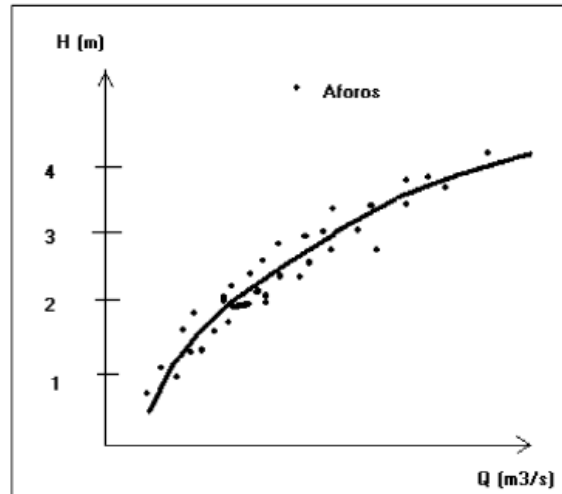


Figura 2.8 Curva de descarga típica (Coello, 2016)

Obtención de caudales

Para obtener los caudales del río Migüir en la estación Migüir D.J. Luspa, se generó primeramente la curva de descarga usando los dos aforos mencionados y un tercer punto, seleccionado de acuerdo a la serie de niveles. Este último se colocó para dar un límite a la ecuación obtenida y evitar valores negativos. Finalmente, mediante un ajuste potencial se obtuvo la ecuación de la curva de descarga, con la cual se obtuvieron los respectivos caudales.

2.3.5.2. Método de transposición de caudales

Este método consiste en encontrar un coeficiente que permita determinar el caudal para la cuenca de interés a partir de datos de caudal de otras cuencas con características similares (Ortiz, 2011). El coeficiente se calculó mediante la expresión 2.15:

$$n = \frac{A_C}{A_A} \left(\frac{P_C - E_C}{P_A - E_A} \right) \quad (2.15)$$

Donde:

A_C = Área de la cuenca sin información (km²)

A_A = Área de la cuenca con información (km²)

P_C = Precipitación media de la cuenca sin información (mm)

P_A = Precipitación media de la cuenca con información (mm)

E_C = Evapotranspiración de la cuenca sin información (mm)

E_A = Evapotranspiración de la cuenca con información (mm)

Con el coeficiente de trasposición de caudales, se calculó el caudal medio para la cuenca sin información con la expresión 2.16:

$$Q_C = n * Q_A \quad (2.16)$$

Donde:

Q_C = Caudal medio de la cuenca sin información (m^3/s)

Q_A = Caudal medio de la cuenca con información (m^3/s)

n = Coeficiente de transposición de caudales

Obtención de caudales

1. Se delimitó el área de drenaje en la estación Migüir D.J. Luspa y se obtuvieron sus características morfométricas de acuerdo al apartado 2.3.1.
2. Se observó en el mapa de cobertura vegetal obtenido del SIGTIERRAS, que ambas microcuencas tenían coberturas similares correspondientes a zonas de páramo, pastizales y vegetación arbustiva, por lo que fue posible despreciar la evapotranspiración en la expresión 2.14.
3. Para determinar el coeficiente de transposición se requiere la relación entre precipitaciones de ambas microcuencas. Sin embargo, debido a que no se disponía de las series de precipitaciones, se determinó la precipitación promedio anual para cada una de las microcuencas a partir del mapa de isoyetas.
4. Ya que la diferencia entre las precipitaciones fue menor del 10%, se pudo asumir que la precipitación en ambas microcuencas es la misma; es decir, que las precipitaciones tienen una variación espacial y temporal semejante. Por lo tanto, el coeficiente de transposición se determinó únicamente por la relación de las superficies de las microcuencas.
5. Para la transposición de caudales se emplearon los caudales medios diarios generados para el río Migüir en el apartado anterior.

2.3.6. Análisis hidrológico de la microcuenca del río El Chorro

2.3.6.1. Precipitación de diseño y temperatura promedio

Periodo de retorno

Para el análisis hidrológico y posterior diseño de la red, se eligió el periodo de retorno de 25 años debido a que el tiempo de funcionamiento esperado de una red de investigación es de 20 a 25 años, para obtener una base de datos confiable y suficiente para futuros estudios. Por otro lado, la mayoría de las estaciones no cuentan con más de 15 años de años de información, por lo que no se puede predecir el comportamiento de la precipitación para periodos de tiempo mucho mayores, ya que se perdería confiabilidad en el análisis.

Precipitación y temperatura promedio

Se determinó la precipitación media anual y la precipitación máxima diaria promedio para el periodo de retorno de 25 años. Esta se calculó a partir del mapa de isoyetas resultante del análisis regional de precipitaciones. Se determinó el área entre isoyetas que cruzan la microcuenca del río El Chorro (A_i) y se determinó la precipitación promedio para cada par de isolíneas (Pm_i). La precipitación promedio de toda la microcuenca se determinó con la ecuación 2.17.

$$Pm = \frac{\sum A_i \times Pm_i}{A_t} \quad (2.17)$$

Dónde:

Pm = Precipitación promedio para T=25 años (mm)

A_i = Área entre dos isoyetas (km²)

Pm_i = Precipitación promedio entre dos isoyetas (mm)

A_t = Área total de la microcuenca (km²)

La temperatura promedio se determinó siguiendo la misma metodología que la precipitación promedio, pero empleando el mapa de isotermas.

2.3.6.2. Hietograma de diseño

El hietograma de diseño de un cierto tiempo permite observar la distribución de la precipitación máxima diaria de diseño en dicho tiempo. Este tiempo se toma entre 2 y 3 veces el tiempo de concentración de la cuenca, para asegurar que se considere toda la tormenta así como permitir los procesos hidrológicos iniciales de infiltración y humedecimiento del suelo. Normalmente en los primeros minutos de iniciada la tormenta la intensidad de la precipitación es mayor y va disminuyendo paulatinamente.

Para la construcción del hietograma de diseño se empleó el Método de los Bloques Alternos, el cual se basa en las Curvas IDF. Este método permite determinar la altura de precipitación en n intervalos de tiempo sucesivos de duración Δt , dentro de una duración total. Con el periodo de retorno escogido de 25 años y empleando las curvas IDF de Labrado, se determinaron las intensidades para cada duración $\Delta t, 2\Delta t$, etc., siendo $\Delta t = 5$ min. La precipitación correspondiente se calculó al multiplicar la intensidad por la duración. Para determinar la precipitación en cada intervalo de tiempo, se restó la precipitación acumulada de la anterior y así sucesivamente para cada intervalo. Finalmente, las precipitaciones se ordenaron de tal manera que la mayor de ellas quede en el centro del hietograma y el resto ubicadas de forma descendente alternativamente a la derecha y a la izquierda respecto al bloque central (Chow et al., 2000).

Para obtener el hietograma de diseño de la microcuenca del río El Chorro, se empleó el hietograma calculado de la estación Labrado y la precipitación máxima promedio de 24 horas para el periodo de retorno de 25 años obtenidas de las isoyetas que cruzan la microcuenca. Mediante una interpolación lineal, se obtuvieron las precipitaciones en cada intervalo y finalmente el hietograma. El hietograma fue utilizado para el cálculo de los caudales pico en HEC-HMS.

2.3.6.3. Curva de duración de caudales (CDC)

La curva de duración de caudales (CDC) muestra el porcentaje de tiempo en que un cierto caudal es igualado o superado. Esta curva es muy empleada para determinar el potencial hídrico de un río porque da una idea del comportamiento de dicho río durante el año. Dentro

de este contexto, para generación hidroeléctrica se necesita tener una potencia firme, lo cual se genera con caudales disponibles el 90 a 95% del tiempo (Fattorelli & Fernández, 2011). En la Figura 2.9 se muestran las principales formas de una curva de duración de caudales.

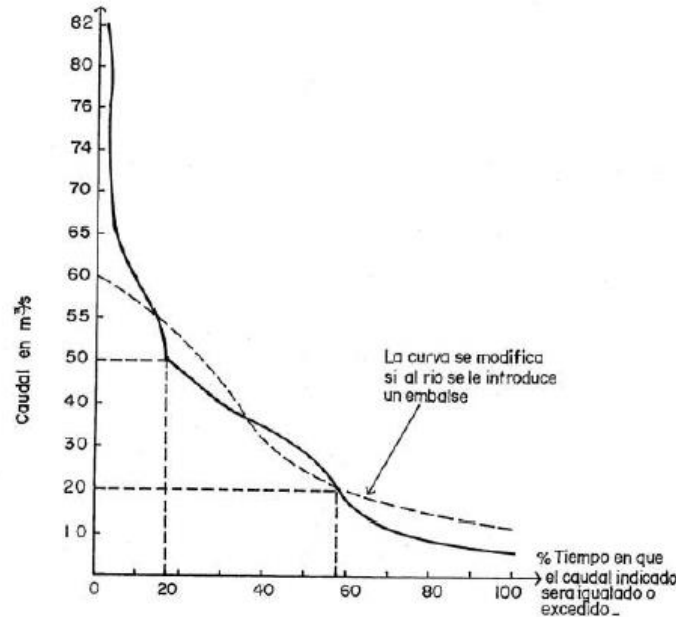


Figura 2.9 Formas típicas de la curva de duración de caudales (Fattorelli & Fernández, 2011)

La forma de la CDC indica el tipo y condiciones del río. Así, una curva plana indica que el río se regula fácilmente y no hay una variación excesiva del caudal (ríos de páramo). Por el contrario, una curva con gran pendiente sugiere un río con caudales extremos, tanto altos como bajos (ríos en zonas urbanas donde el suelo es más impermeable) (Fattorelli & Fernández, 2011). Así mismo, esta curva es una evidencia de degradación de los suelos (Cisneros & Coello, 2009).

Para construir la CDC, se emplearon los caudales diarios de la microcuenca del río El Chorro obtenidos mediante transposición de caudales. La frecuencia de los datos se obtuvo de ordenar dichos datos de mayor a menor y dividir la posición para el número total de datos.

Caudal base

El caudal base es aquel que conserva un cauce cuando no se presentan eventos de precipitación que puedan generar escorrentía directa. Después de un tiempo suficiente de ocurrida una tormenta, el flujo disminuye hasta llegar al caudal base, el cual puede ser alto o bajo

dependiendo de las condiciones de la vegetación, el suelo, etc. Para la presente investigación, el caudal base del río El Chorro se asumió como el percentil 75 (Q75); es decir, el caudal que se produce el 75% del tiempo. Por el contrario, el caudal base para la modelación del hidrograma de diseño en HEC-HMS para obras de control se tomó por seguridad el percentil 25 (Q25), para asumir que el cauce presenta un flujo importante al inicio de la creciente.

Caudal mínimo

El caudal mínimo se determinó como el valor mínimo dentro de la serie de caudales. Para establecer este caudal se requiere una serie hidrológica de larga duración, por ello los valores encontrados en la investigación son preliminares y deben asumirse con discreción.

2.3.6.4. Caudal ecológico

El caudal ecológico es aquel mínimo requerido para asegurar el equilibrio natural de un ecosistema y su estudio es importante en proyectos de aprovechamiento hídrico. Existen muchos métodos para determinarlo, desde el punto de vista hidrológico, hidráulico o biológico. Optar por cualquiera de ellos dependerá del tipo de proyecto, la disponibilidad de información y la región de estudio. Un método de fácil aplicación es el método hidrológico de la Dirección General de Obras Hidráulicas de España (DGOH) que recomienda tomar el caudal ecológico como el 10% del caudal medio anual (CRQ & CIDERA, 2011). Basado en este criterio, se determinó el régimen de caudales ecológicos tomando el 10% del caudal medio mensual.

2.3.6.5. Determinación del caudal máximo de diseño mediante el Método SCS, usando el software HEC-HMS

Obtención de la precipitación efectiva por el Método del Soil Conservation Service (SCS)

Para determinar el caudal máximo de la microcuenca de El Chorro, se empleó el método SCS. El método SCS propuesto por el Soil Conservation Service (1994), determina la escorrentía neta generada en una tormenta. Es decir, toma en cuenta las pérdidas de lluvia por la interceptación de la vegetación, infiltración en el suelo y el almacenamiento de agua en ciertas

zonas, antes de la formación de la escorrentía superficial (López, 2001). Las siguientes expresiones caracterizan el método.

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P - I_a} \quad (2.18)$$

Donde:

F_a = Retención efectiva de la precipitación (mm)

S = Retención potencial (mm)

P_e = Precipitación efectiva (mm)

P = Precipitación bruta (mm)

I_a = Pérdidas iniciales (mm)

De acuerdo al principio de la conservación de la masa, se establece que:

$$P = P_e + I_a + F_a \quad (2.19)$$

Dando a lugar a la siguiente expresión:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (2.20)$$

I_a se puede definir en función de S , mediante la constante λ , estimada por mediciones experimentales de 0,2. A su vez, S depende de un factor NC (número de curva), el cual varía en función de la cobertura, uso y tipo de suelo; características hidrológicas; y el efecto de lluvias anteriores (López, 2001). Mientras la precipitación sea menor a las pérdidas iniciales de $0.2S$, no se producirá escorrentía. La ecuación 2.20 en función de S , se establece como:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad \text{si } P > 0.2S \quad (2.21)$$
$$P_e = 0 \quad \text{si } P \leq 0.2S$$

$$S = \frac{25400}{NC} - 254 \quad (2.22)$$

La Figura 2.10 muestra una explicación gráfica del método SCS.

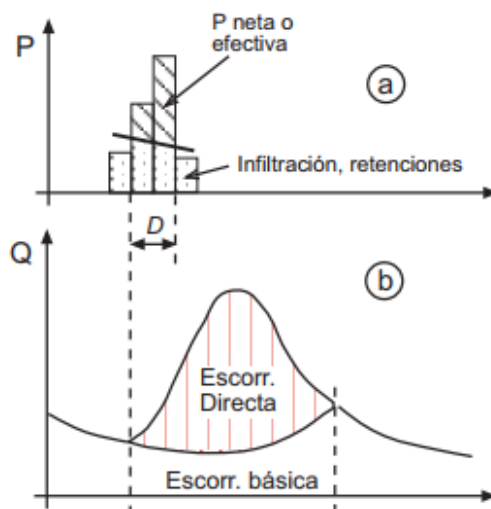


Figura 2.10 Esquema de la precipitación efectiva y su equivalente en escorrentía directa (F. Javier, 2016)

NC varía entre 0 y 100, donde 0 representa un suelo muy permeable o que retiene toda la precipitación y 100 un suelo impermeable. Para su cálculo, existen varias tablas, las cuales han sido obtenidas para suelos regionales en la zona oeste de Estados Unidos. Es por ello, que se debe tener especial cuidado cuando se establezca un valor para NC es zonas distintas, y si es posible, se deben comparar los resultados con otros métodos (López, 2001). Es por ello que en esta investigación se usaron valores de NC que han sido asumidos para otras microcuencas de páramo (Anexo 2.8).

El valor del NC para toda la microcuenca se determinó en base al mapa de cobertura del suelo obtenido del SIGTIERRAS y realizando una ponderación de acuerdo al área ocupada por cada cobertura. Sin embargo, una parte del mapa se encontraba sin información debido a la restricción de datos en zonas protegidas como es el Parque Nacional Cajas. Para completar esta parte se asumió que estaba conformada por 70% afloramiento rocoso y 30% páramo, siguiendo la tendencia del mapa.

Hidrograma triangular unitario o SCS

El hidrograma triangular unitario representa el hidrograma de escorrentía directa que se formaría en una cuenca por una $P_e = 1mm$ en una unidad de tiempo (1h, 30min, 10 min) (Chow et al., 2000). Se lo representa como un triángulo debido a que el hidrograma se asemeja a este. En la Figura 2.11 se pueden observar las diferentes partes del hidrograma.

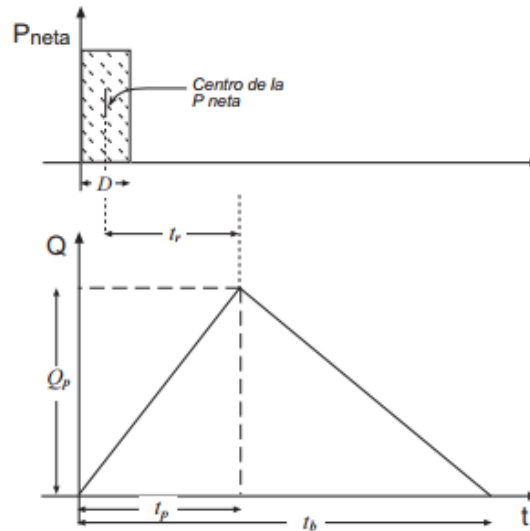


Figura 2.11 Hietograma de precipitación efectiva y su equivalente en el hidrograma triangular unitario (F. Javier, 2016)

A continuación, se presentan las expresiones para el cálculo de cada parámetro (Chow et al., 2000).

$$t_p = \frac{D}{2} + 0.6 * t_c \quad (2.23)$$

$$t_c = 0.0195 * \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0.385} \quad (2.24)$$

$$t_r = 0.6 * t_c \quad (2.25)$$

$$t_b = 2.67 * t_p \quad (2.26)$$

Donde:

t_p = Tiempo donde se produce el caudal pico (h)

D = Duración de la precipitación efectiva (h)

t_c = Tiempo de concentración (h)

L = Longitud del cauce principal (m)

H = Diferencia de elevación en la cuenca (m)

t_r = Tiempo de retardo (h)

t_b = Tiempo total del hidrograma unitario (h)

El caudal pico del hidrograma unitario se obtiene con la ecuación 2.27.

$$Q_p = \frac{0.208 * A * P_e}{t_p} \quad (2.27)$$

Donde:

Q_p = Caudal pico (m^3/s)

A = Área de la cuenca (km^2)

P_e = Precipitación efectiva de 1mm

Para obtener el hidrograma real en cada intervalo de tiempo D, la P_e de la ecuación 2.27 se reemplaza por la obtenida con el método SCS. Dichos hidrogramas se encuentran desfasados cada uno un tiempo D, lo que se puede observar gráficamente en la Figura 2.12. El Hidrograma total se obtiene de la suma de todos los hidrogramas obtenidos para cada intervalo D.

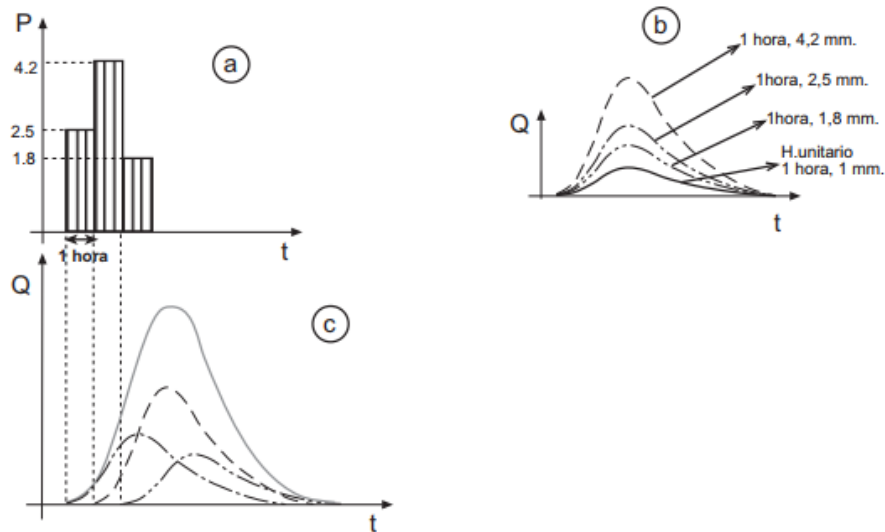


Figura 2.12 Hietograma de precipitación efectiva y su equivalente en el hidrograma de escorrentía directa (F. Javier, 2016)

2.3.6.6. Aplicación del Software HEC-HMS

El programa HEC-HMS, permite determinar para un cierto punto de drenaje el hidrograma de crecida para una tormenta de diseño. Para ello el programa requiere de la delimitación de la cuenca, la red de drenaje, el hietograma de diseño, las características de la cuenca y el caudal base.

Es importante asignar valores apropiados de los diferentes parámetros del programa como: constante de recesión, impermeabilidad y la razón entre el pico.

– *Constante de recesión*

La constante de recesión (recession constant) es la pendiente de descarga desde el caudal pico hasta el caudal base. Está relacionada con el tiempo que se requiere para que el flujo pico descienda hasta el caudal base y puede variar entre 0.8 y 0.9.

– *Impermeabilidad*

La impermeabilidad (impervious) se refiere al porcentaje de zonas impermeables dentro de la cuenca. Este valor se define de forma aproximada de acuerdo a la cobertura del suelo y varía desde 0 a 8.

– *Razón entre el pico y el caudal base*

La razón entre el pico y el caudal base (ratio) permite establecer cuan mayor es el caudal pico respecto al caudal base. Este valor varía entre 0 y 1.

Para determinar los hidrogramas en HEC-HMS, se asumieron los siguientes valores de los parámetros antes mencionados, basados en recomendaciones del manual técnico del HMS y de literatura especializada en microcuencas de la región:

- Constante de recesión = 0.85
- Impermeabilidad = 2%
- Razón = 0.1

Finalmente, los hidrogramas se generaron en intervalos de 1 minuto para un tiempo de 2 horas.

2.3.7. Diseño de la red hidrometeorológica

El diseño de una red de monitoreo consiste en establecer la ubicación de las estaciones para la recolección de datos y definir los tipos de instrumentos a utilizarse; es decir, sus características y especificaciones técnicas. Una vez establecido lo anterior, se describe la información completa del sitio y su ubicación, y se define la variable hidrometeorológica que se medirá.

Para un buen funcionamiento y el logro de los objetivos planteados, se deben realizar tareas de inspección de manera tal que los datos registrados sean continuos y confiables. Adicionalmente, se deben realizar mediciones y calibraciones periódicamente para detectar si existen o no errores en los registros (OMM, 2011).

2.3.7.1. Ubicación de estaciones hidrológicas y climatológicas

Para la ubicación de las estaciones que forman parte de una red de monitoreo se consideraron criterios técnicos tales como el comportamiento espacial de la variable a monitorear, la accesibilidad a sitios en donde se pretende colocar la estación, el tipo de equipo para la medición, población existente, la red fluvial de la cuenca, entre otras. A continuación se detallan los criterios considerados:

Comportamiento espacial de las variables meteorológicas

El número de equipos que se requieren colocar para el monitoreo depende del tamaño de la cuenca y de la variación espacial de las variables hidrometeorológicas (precipitación, temperatura, humedad, viento, entre otras). Dos estaciones no deben ubicarse muy distanciadas pues de esta manera una parte de la cuenca quedaría sin registro de precipitación. También puede suceder que uno de los equipos deje de funcionar, por lo que se necesitaría de otra estación cercana que continúe registrando los datos. De la misma manera para las variables climatológicas, las estaciones no se deben colocar a un mismo nivel altitudinal o niveles semejantes pues estas varían con la cota y se registrarían temperaturas y otras variables climáticas semejantes.

Topografía

Se debe elegir un lugar estable y sin pendientes pronunciadas, para garantizar la seguridad de operadores y de los equipos.

Equipos existentes

Si existen equipos ya instalados, es necesario observar en qué estado se encuentran y colocar un nuevo equipo o repararlo para continuar con el registro de la información. Además, la colocación de un nuevo equipo debe complementar a la red ya existente.

Localización

Es conveniente verificar la existencia de población en la zona donde se colocará un equipo, para que colaboren con el mantenimiento y seguridad del mismo.

Existencia de accesos

Se debe identificar si existen vías de acceso hacia los sitios donde se colocarán las estaciones, para facilitar la instalación del equipo y los posteriores trabajos de mantenimiento, monitoreo y operación.

Red fluvial principal

Para el monitoreo hidrológico es fundamental ubicar las estaciones de medición en los ríos importantes no sólo del curso principal sino de los tributantes que presenten interés hidrológico especial.

2.3.7.2. Ubicación y diseño de estructuras hidráulicas

Las estructuras hidráulicas se ubicaron en las principales microcuencas dentro de la región del río El Chorro, tomando en cuenta que al menos exista una en la microcuenca del río Blanco, ya que es la de mayor interés y otra a la salida de la microcuenca del río El Chorro.

Para el diseño de las estructuras de control, se determinaron los caudales máximos o de diseño, mediante el programa HEC-HMS (apartado 2.3.6.6). Para el efecto se delimitaron las microcuencas usando el programa ArcGIS y se calcularon los parámetros morfométricos y el Número de Curva (NC). Además, debido a que las microcuencas tienen áreas de drenaje menores, se espera que el caudal base sea inferior al calculado para toda la microcuenca del río El Chorro. Es por ello que se asumió un caudal menor a criterio. El resto de parámetros requeridos por el programa se tomaron los mismos, dado que fueron asumidos para toda la microcuenca de estudio.

Para las estructuras de control se optaron por canales tipo Parshall debido a que los caudales de diseño fueron mayores a $1 \text{ m}^3/\text{s}$, donde vertederos rectangulares o triangulares no operarían adecuadamente.

Canal Parshall

El canal Parshall consta de tres partes principales: una sección convergente a la entrada, una garganta y una sección divergente a la salida. El fondo del canal presenta variaciones en la pendiente; a la entrada una rampa ascendente de 1:4 de pendiente, luego un tramo horizontal donde se encuentra la sección de control. En el tramo de la garganta el fondo es descendente y después vuelve a subir para conectarse al canal de salida (Figura 2.13) (IMTA, 1988).

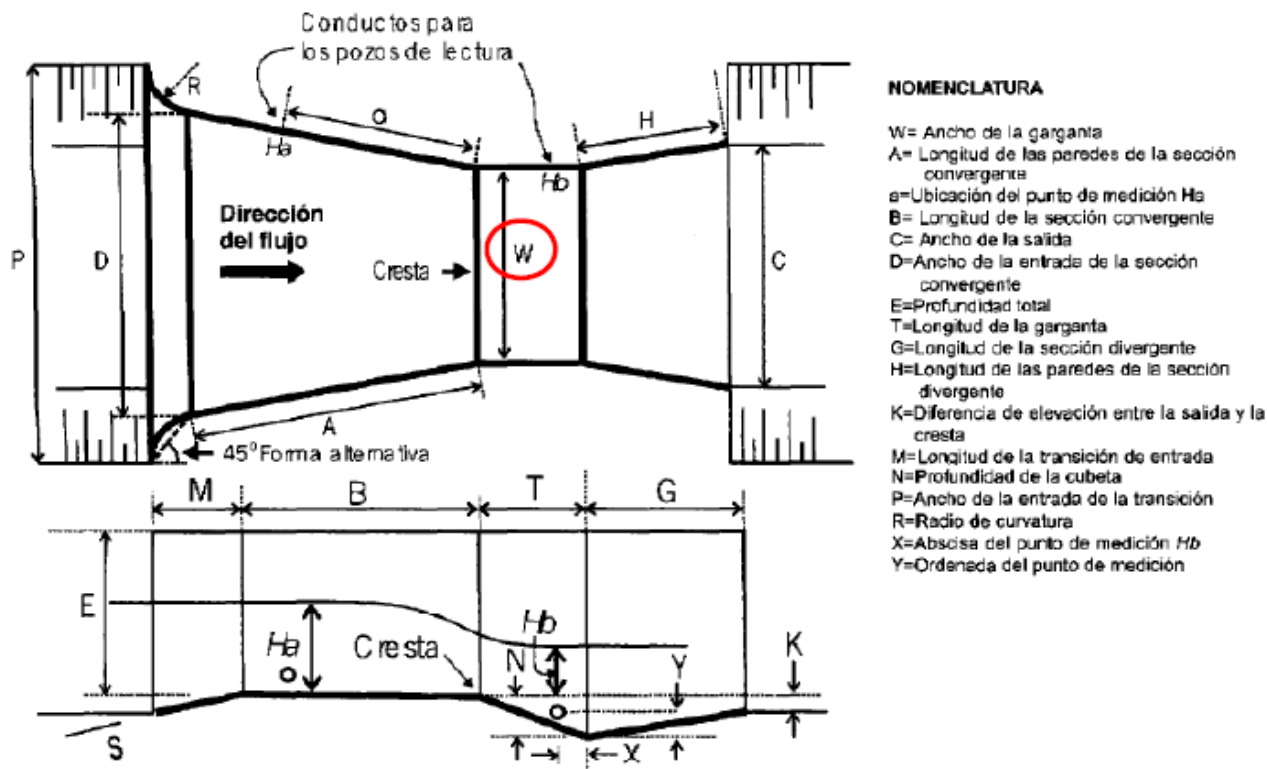


Figura 2.13 Vista en planta y perfil de un canal Parshall (Coello, 2016)

El canal Parshall tiene la ventaja de producir baja pérdida de energía debido a que disminuye la sección pero no obstruye completamente el flujo como el caso de los vertederos. Además, debido a que en la garganta el flujo aumenta de velocidad, se promueve la limpieza de sedimentos. De la misma manera, el canal Parshall funciona con gran exactitud para caudales variables y requiere sólo de la altura de agua H_a para conocer el caudal que está circulando a través del canal (Lux, 2010).



La geometría del canal Parshall viene tabulada para distintos rangos de caudal y ancho de la garganta. Su diseño consiste básicamente en establecer las dimensiones de las distintas partes del canal. La ecuación que caracteriza un canal Parshall es de la forma (IMTA, 1988):

$$Q = k(H_a)^n \quad (2.28)$$

Donde:

Q = Caudal que pasa a través del canal (m^3/s)

k y n = Constantes que dependen del ancho de la garganta

H_a = Altura de agua en el aforador, dentro de la zona convergente (m)

A continuación, se presentan las tablas para el diseño de los canales.



Tabla 2.3 Diseños típicos de un canal Parshall (m)

w	A	a	B	C	D	E	T	G	K	M	N	P	R	X	Y
0.0254	0.363	0.242	0.356	0.093	0.167	0.229	0.076	0.203	0.019		0.029			0.008	0.013
0.0508	0.414	0.276	0.406	0.135	0.214	0.254	0.114	0.254	0.022		0.043			0.016	0.025
0.0762	0.467	0.311	0.457	0.178	0.259	0.457	0.152	0.305	0.025		0.057			0.025	0.038
0.1524	0.621	0.411	0.61	0.301	0.397	0.61	0.305	0.310	0.075	0.305	0.114	0.902	0.406	0.051	0.076
0.2286	0.879	0.587	0.864	0.381	0.575	0.762	0.305	0.457	0.076	0.305	0.114	1.080	0.406	0.051	0.076
0.3048	1.372	0.914	1.343	0.61	0.845	0.914	0.61	0.914	0.076	0.381	0.229	1.492	0.508	0.051	0.076
0.4572	1.446	0.965	1.419	0.762	1.026	0.914	0.61	0.914	0.076	0.381	0.229	1.676	0.508	0.051	0.076
0.6096	1.524	1.016	1.495	0.914	1.206	0.914	0.61	0.914	0.076	0.381	0.229	1.854	0.508	0.051	0.076
0.9144	1.676	1.118	1.645	1.219	1.572	0.914	0.61	0.914	0.076	0.381	0.229	2.222	0.508	0.051	0.076
1.2192	1.829	1.219	1.794	1.524	1.937	0.914	0.61	0.914	0.076	0.457	0.229	2.711	0.610	0.051	0.076
1.5240	1.981	1.321	1.943	1.829	2.302	0.914	0.61	0.914	0.076	0.457	0.229	3.08	0.610	0.051	0.076
1.6288	2.134	1.422	2.092	2.134	2.667	0.914	0.61	0.914	0.076	0.457	0.229	3.442	0.610	0.051	0.076
2.1336	2.286	1.524	2.242	2.438	3.032	0.914	0.61	0.914	0.076	0.457	0.229	3.81	0.610	0.051	0.076
2.4384	2.438	1.626	2.391	2.743	3.397	0.914	0.61	0.914	0.076	0.457	0.229	4.172	0.610	0.051	0.076
3.0480		1.829	4.267	3.658	4.758	1.219	0.914	1.829	0.152		0.343			0.305	0.229
3.6580		2.032	4.887	4.47	5.607	1.524	0.914	2.438	0.152		0.343			0.305	0.229
4.5720		2.337	7.620	5.588	7.62	1.829	1.219	3.048	0.229		0.457			0.305	0.229
6.0960		2.845	7.620	7.315	9.144	2.134	1.829	3.658	0.305		0.686			0.305	0.229
7.6200		3.353	7.620	8.941	10.668	2.134	1.829	3.962	0.305		0.686			0.305	0.229
9.1440		3.861	7.925	10.566	12.313	2.134	1.829	4.267	0.305		0.686			0.305	0.229
12.1920		4.877	8.230	13.818	15.481	2.134	1.829	4.877	0.305		0.686			0.305	0.229
15.2400		5.893	8.230	17.272	18.529	2.134	1.829	6.096	0.305		0.686			0.305	0.229

Fuente: Manual de diseño de estructuras de aforo del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 1988)

Tabla 2.4 Valores de la garganta (w) y los parámetros k y n para cada rango de caudal

Límites de caudal				
W(m)	Qmín	Qmáx	k	n
0.025	0.090	5.4	0.0604	1.550
0.050	0.180	13.2	0.1207	1.550
0.075	0.770	32.1	0.1771	1.550
0.150	1.500	111	0.3812	1.580
0.225	2.500	251	0.5354	1.530
0.305	3.320	457	0.6909	1.522
0.455	4.800	695	1.0560	1.538
0.610	12.10	937	1.4280	1.550
0.915	17.60	1427	2.1840	1.566
1.220	35.80	1923	2.9530	1.578
1.525	44.10	2424	3.7320	1.587
1.830	74.10	2929	4.5190	1.595
2.135	85.80	3438	5.3120	1.601
2.440	97.20	3949	6.1120	1.606
3.050	160.0	8280	7.4630	1.600
3.660	190.0	14680	8.8590	1.600
4.580	230.0	25040	10.9600	1.600
6.100	310.0	37970	14.4500	1.600
7.630	380.0	47140	17.9400	1.600
9.150	460.0	56330	21.4400	1.600
12.200	600.0	74700	28.4300	1.600
15.250	750.0	93040	35.4100	1.600

Fuente: Manual de diseño de estructuras de aforo del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 1988)

2.3.7.3. Recomendación de equipos de medición

Se recomienda adquirir aquellos equipos que se utilizan en el medio, debido a que las empresas tienen conocimiento en su manejo y operación; además, porque existe una mayor facilidad para la importación de los mismos. Por otro lado, los equipos deben tener una vida útil consistente con el tipo de red de monitoreo, caso contrario se podrían generar vacíos en la información por el daño temprano de los equipos. Adicionalmente, los equipos deben ser aptos para los ambientes climáticos donde serán instalados y su precisión acorde con los objetivos de la red.

Capítulo 3: Resultados y discusión

3.1. Parámetros morfométricos e índices hidrológicos

Del procesamiento de la cartografía disponible se determinaron los diferentes parámetros morfométricos e hidrológicos de la microcuenca del río Chorro los que se indican en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Resumen de los parámetros morfométricos e índices hidrológicos de la microcuenca del río El Chorro.

Parámetros morfométricos		Característica
Área (km ²)	26.58	Pequeña
Perímetro (km)	25.28	
Cota máx (msnm)	4400	
Cota mín (msnm)	2200	
Altitud media (msnm)	3637	
Desnivel altitudinal (m)	2200	Desnivel alto
Longitud de la microcuenca (m)	9314.28	
Longitud cauce principal (m)	7389.29	Cauce corto
Forma de la microcuenca (Kf)	0.49	
Coeficiente de compacidad (Kc)	1.38	Moderadamente achatada De oval redonda a oval oblonga
Densidad de drenaje (Dd) (km/ km ²)	0.82	
Pendiente media de la microcuenca (%)	46.29	Bajo
Índices hidrológicos		
Tc (min)	29.61	Rápido
Tr (min)	17.77	

Según la clasificación de Campos (1992), la microcuenca de investigación es pequeña pues se encuentra en el rango de 25 a 250 km² (ver Anexo 3.1). El hecho de que la microcuenca sea pequeña influye en el volumen de escurrimiento resultante, añadiendo que se debe considerar también el efecto de la cobertura y el tipo de suelo existente. Además, la microcuenca tiene un desnivel altitudinal alto, de 2200m, lo cual indica una mayor variabilidad en las variables meteorológicas. Por otro lado, la longitud de su cauce principal es corto, su densidad de drenaje es baja y es una microcuenca tipo alargada. Según estas características la microcuenca no concentra grandes cantidades de agua (cuenca alargada) y los recorridos del flujo son cortos. La gran pendiente provoca que el agua se escurra rápidamente dando como resultado un tiempo de concentración bajo.

3.2. Control de calidad de la información recopilada

3.2.1. Diagramas de caja de las precipitaciones anuales

En la Figura 3.1 se muestran los diagramas de caja de 16 de las 17 estaciones con información de precipitación, usadas en la investigación.

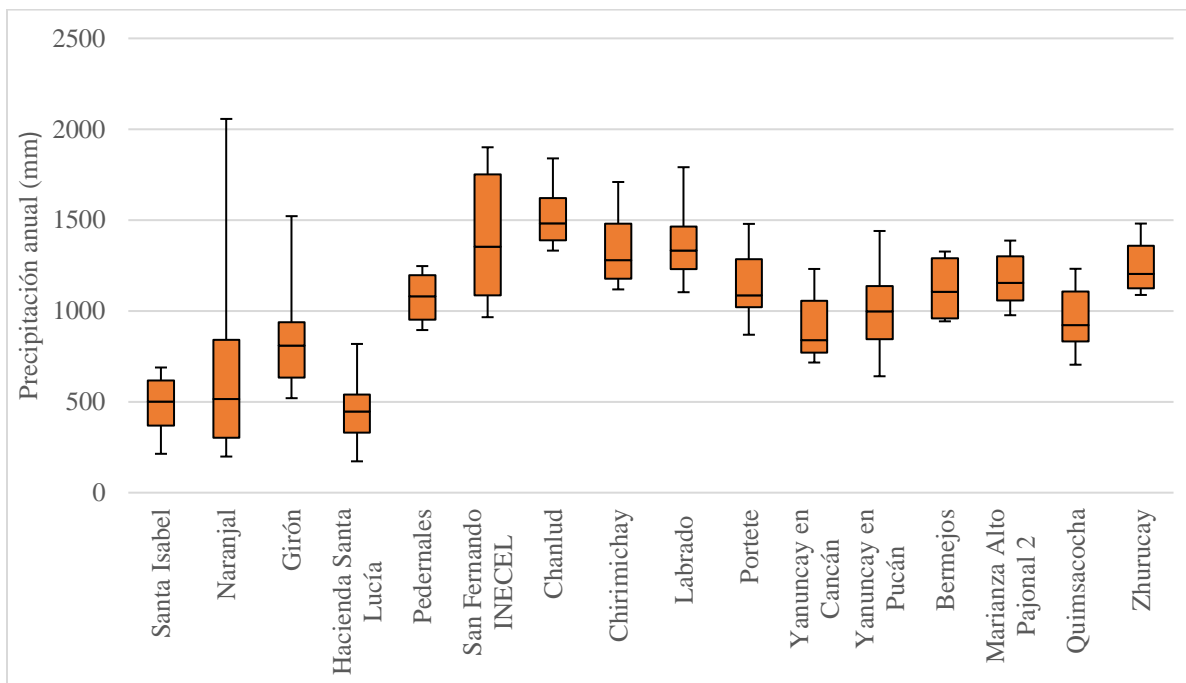


Figura 3.1 Diagrama de caja anuales de las estaciones meteorológicas usadas en el estudio

Se observa que el rango de precipitación está entre los 200 y 1800 mm anuales y la precipitación promedio es de 1000 mm aproximadamente. Sin embargo, las estaciones ubicadas en cotas más altas (desde Pedernales en adelante) se mantienen en un rango de variación mucho menor, oscilando entre 1000 y 1500 mm. Por el contrario, las estaciones localizadas en cotas más bajas oscilan entre 400 y 1000 mm. Esto sucede principalmente en la región árida del río Jubones en el sector de Minas de Huasachaca y Santa Isabel donde la zona es conocida por presentar lluvias escasas. Este comportamiento se presenta para altitudes inferiores a los 1800 msnm; sin embargo, las estaciones de mayor interés en la investigación son aquellas ubicadas en altitudes superiores a los 2200 msnm.

Se puede notar que la estación Naranjal presenta mayor dispersión en los datos, especialmente en valores extremos, teniendo la mayor precipitación anual de todas las estaciones, de más de

2000 mm. Esto se debe a que dicha estación está influenciada por el régimen de la costa, en donde los inviernos son más marcados que en la Sierra. De la misma manera, las estaciones Girón y San Fernando presentan una considerable dispersión. En el primer caso, la dispersión se presenta en los valores altos, con un valor extremo de 1500 mm aproximadamente. En el caso de San Fernando, la dispersión se evidencia en el rango intercuartílico.

Adicionalmente, las estaciones Portete y Yanuncay en Cancán presentan el 50% de los datos más concentrados bajo la mediana, lo que no sucede con el otro 50% que presentan mayor dispersión. Finalmente, el resto de las estaciones no presentan mayor variabilidad en los datos y parecen tener un comportamiento normal.

3.2.2. Identificación de outliers mediante el método de Tukey

En la Figura 3.2 se muestra el resultado de la identificación de outliers en los datos de precipitación máxima 24 horas de las 13 estaciones meteorológicas.

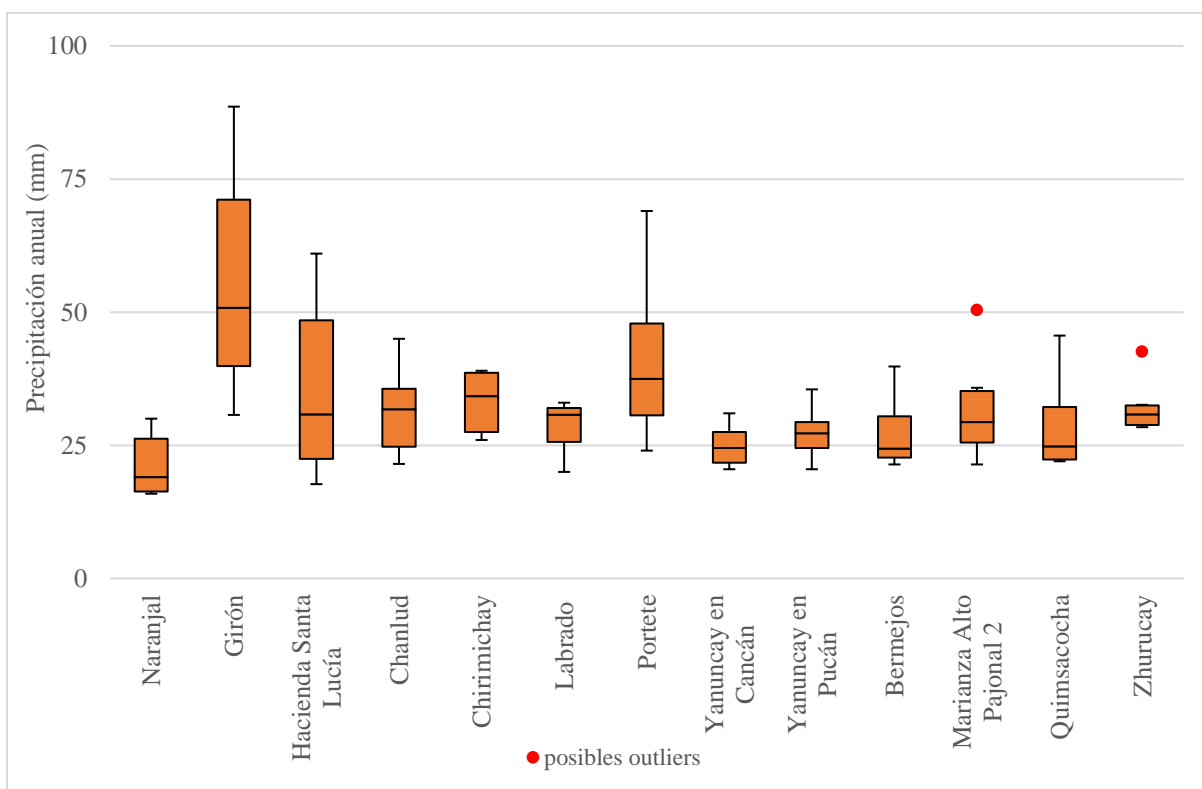


Figura 3.2 Diagramas de caja y posibles outliers de las precipitaciones máximas 24 horas

Se pueden apreciar dos posibles outliers en las estaciones Marianza Alto Pajonal 2 y Zhurucay. A pesar de que los valores no son muy altos, difieren considerablemente del resto de datos de dichas estaciones, las cuales tienen valores de precipitación de entre 25 y 35 mm diarios. Principalmente en Zhurucay se observa que prácticamente el 100% de los datos están concentrados en 30 mm aproximadamente. Sin embargo, debido a que se encuentran en zonas de páramo donde las precipitaciones tienen una alta variabilidad espacial y temporal, se consideran datos válidos. Además, que según el método de Tukey los cataloga como “posibles outliers”, es decir que la probabilidad de que lo sean es muy baja.

Se puede apreciar que la mayoría de las estaciones registran precipitaciones máximas 24 horas entre 25 y 50 mm, a excepción de la estación Girón que presenta una mayor dispersión en los datos, oscilando entre 25 y 75 mm; además, registra el mayor valor de precipitación máxima 24 horas de 90 mm aproximadamente.

En cuanto a la tendencia de los datos, se puede observar que la mayoría de las estaciones no presenta un comportamiento simétrico y los datos se muestran concentrados en un extremo u otro de la mediana. Este es particularmente visible en Quimsacocha, Bermejós, Labrado y Naranjal.

En conclusión, los datos de precipitación máxima en 24 horas presentan confiabilidad en su muestra y permitirán someterlos a pruebas estadísticas y probabilidad.

3.3. Procesamiento de la información

3.3.1. Prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov

En la Tabla 3.2 se presenta el resultado del análisis de la bondad de ajuste mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov de las precipitaciones máximas 24 horas.

Tabla 3.2 Resultado de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov para las estaciones empleadas

Estación	D_{α}	D_N		Bondad ajuste
		Gumbel	Normal	
Naranjal	0.409	0.129	0.195	Se acepta
Girón	0.430	0.111	0.167	Se acepta
Hacienda Santa Lucía	0.349	0.112	0.170	Se acepta
Chanlud*	0.349	0.106	0.100	Se acepta
Chirimichay	0.519	0.155	0.216	Se acepta
Labrado*	0.349	0.205	0.192	Se acepta
Portete	0.327	0.092	0.141	Se acepta
Yanuncay en Cancán	0.318	0.096	0.133	Se acepta
Yanuncay en Pucán*	0.309	0.155	0.110	Se acepta
Bermejós	0.454	0.151	0.188	Se acepta
Marianza Alto Pajonal 2*	0.375	0.122	0.108	Se acepta
Quimsacocha	0.409	0.199	0.211	Se acepta
Zhurucay	0.454	0.195	0.220	Se acepta

* Se ajustan mejor con la Distribución Normal

Se observa que todas las estaciones se ajustan bien a las dos distribuciones de probabilidad analizadas: Gumbel y Normal, dando valores de D_N mucho menores al límite aceptable. Además, del total de estaciones, 4 de ellas se ajustan mejor a la distribución Normal y el restante a la de Gumbel.

En este caso, todas las estaciones presentan un comportamiento Normal; sin embargo, esta distribución es más usada para precipitaciones anuales que son el resultado de la suma de muchos eventos independientes. Además, en hidrología generalmente se usan distribuciones de probabilidad exclusivas para variables extremas (Gumbel, Frechet y Weibull), ya que es usual que este conjunto de datos se ajusten a una distribución diferente al de toda la población (Chow et al., 2000).

Por otro lado, ya que Gumbel es una distribución de variables extremas ampliamente utilizada y por facilidad de análisis, se optó por proyectar las precipitaciones máximas 24 horas para distintos periodos de retorno, usando únicamente esta distribución.

3.3.2. Precipitaciones máximas diarias

A continuación se presentan en la Tabla 3.3 las precipitaciones máximas diarias para los distintos periodos de retorno, obtenidos mediante la distribución de probabilidad de Gumbel.

Tabla 3.3 Precipitaciones máximas diarias para 5, 10, 25 y 50 años usando la distribución de probabilidad de Gumbel (mm)

Estación	T= 5 años	T=10 años	T=25 años	T=50 años
Naranjal	25.3	28.5	32.5	35.5
Girón	68.3	79.6	93.8	104.4
Hacienda Santa Lucía	44.5	52.7	63.1	70.8
Chanlud	35.7	39.4	44.1	47.6
Chirimichay	37.5	41.0	45.3	48.5
Labrado	31.9	34.7	38.1	40.7
Portete	48.7	55.8	64.8	71.4
Yanuncay en Cancán	26.9	28.7	31.1	32.9
Yanuncay en Pucán	30.3	32.8	36.1	38.5
Bermejos	31.2	34.8	39.4	42.8
Marianza Alto Pajonal 2	36.5	41.1	47.0	51.3
Quimsacocha	33.1	37.6	43.2	47.3
Zhurucay	35.2	37.9	41.4	43.9

De acuerdo a la Tabla 3.3, la estación con mayor precipitación máxima 24 horas es Girón con un valor de 104.4 mm. La estación de Chaucha presenta solo dos años completos de información, por lo que el ajuste a una distribución de probabilidad tiene mayor incertidumbre y sobrestima los valores proyectados. Sin embargo, debido a que las precipitaciones registradas son muy intensas y considerando que es la estación meteorológica más cercana a la microcuenca de estudio, se consideró apropiado usar sus registros y considerarlas en el análisis espacial de eventos.

3.3.3. Curvas IDF para la estación Labrado

En la Figura 3.3 se presentan las curvas IDF de la estación Labrado, las cuales son consideradas representativas de la microcuenca de estudio.

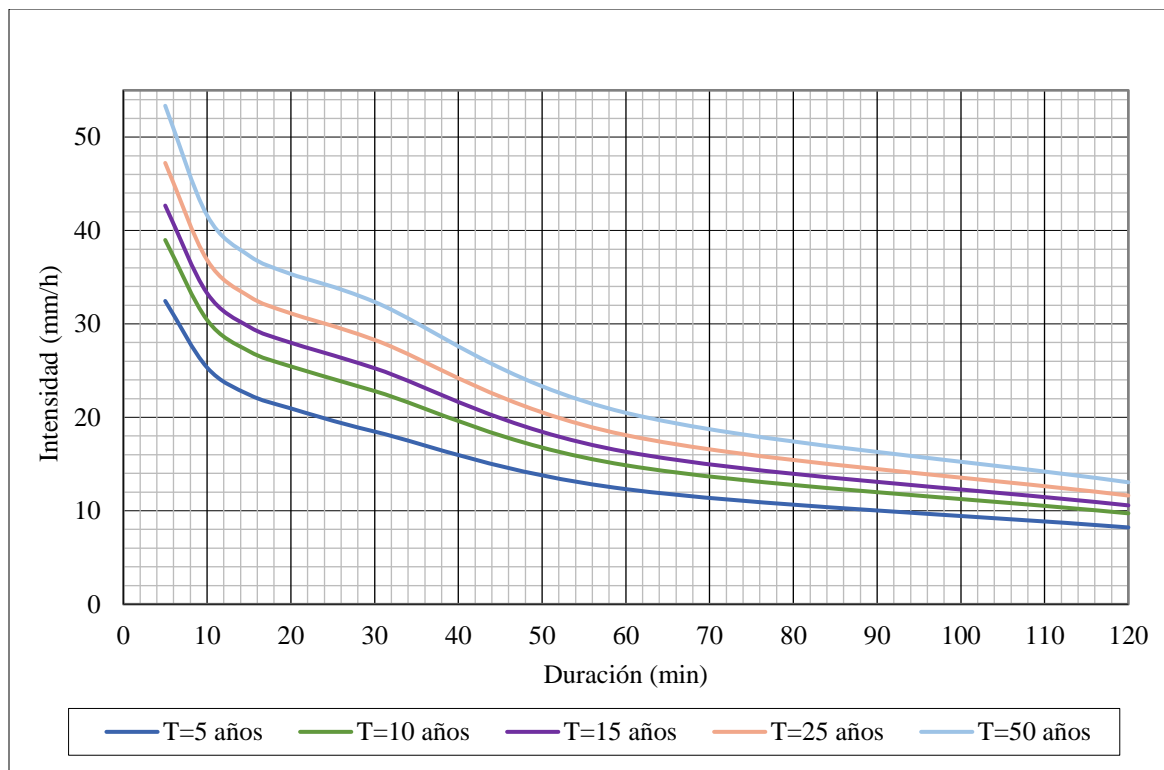


Figura 3.3 Curvas IDF para periodos de retorno de 5, 10, 15, 25 y 50 años de la estación Labrado. Se muestran las intensidades para duraciones de hasta 2 horas

Se observa que en los primeros 10 minutos de duración, la intensidad disminuye bruscamente. Posteriormente, en los siguientes 10 minutos, la intensidad de la lluvia decrece con una pendiente menos pronunciada y en los próximos 20 minutos la variación es aún menor. A partir de los 40 minutos se aprecia que la intensidad de la lluvia disminuye de manera casi constante hasta las 2 horas de duración de las curvas.

Se puede apreciar una gran diferencia entre la intensidad esperada para una frecuencia de 5 años y una de 50 años. A los 5 minutos, la diferencia es de 20 mm/h aproximadamente y esta diferencia es mucho menor a las 2 horas de duración donde resulta ser de 3 mm/h. En el Anexo 3.2 se muestran las curvas IDF para las 24 horas de duración.

3.4. Análisis regional de las precipitaciones y temperaturas

En los siguientes subcapítulos se presentan los mapas de isolíneas y los diagramas de correlación de la precipitación y temperatura promedio, mediante las cuales se pudo establecer el comportamiento meteorológico a nivel regional.

3.4.1. Variación espacial y temporal de la precipitación

3.4.1.1. Variación espacial

En la Tabla 3.4 se presentan las precipitaciones promedio anuales de cada estación con las que se construyó el mapa de isoyetas mostrado en la Figura 3.4, las cuales se encuentran espaciadas cada 100 mm y muestran la variación espacial de la precipitación anual en la región.

Tabla 3.4 Precipitación promedio anual de las 17 estaciones meteorológicas

Estación	Precipitación promedio anual (mm)
Santa Isabel	490
Naranjal	632
Girón	808
Hacienda Santa Lucía	442
Pedernales	1075
San Fernando INECEL	1391
Chanlud	1511
Chirimichay	1331
Labrado	1378
Portete	1145
Yanuncay en Cancán	911
Yanuncay en Pucán	996
Chaucha	1092
Bermejos	1121
Marianza Alto Pajonal 2	1174
Quimsacocha	974
Zhurucay	1234

De acuerdo a la Tabla 3.4, la estación Chanlud registra el año de mayor precipitación anual de 1511 mm. En contraste, la estación Hacienda Santa Lucía registra el año de menor precipitación, con un valor de 442 mm.

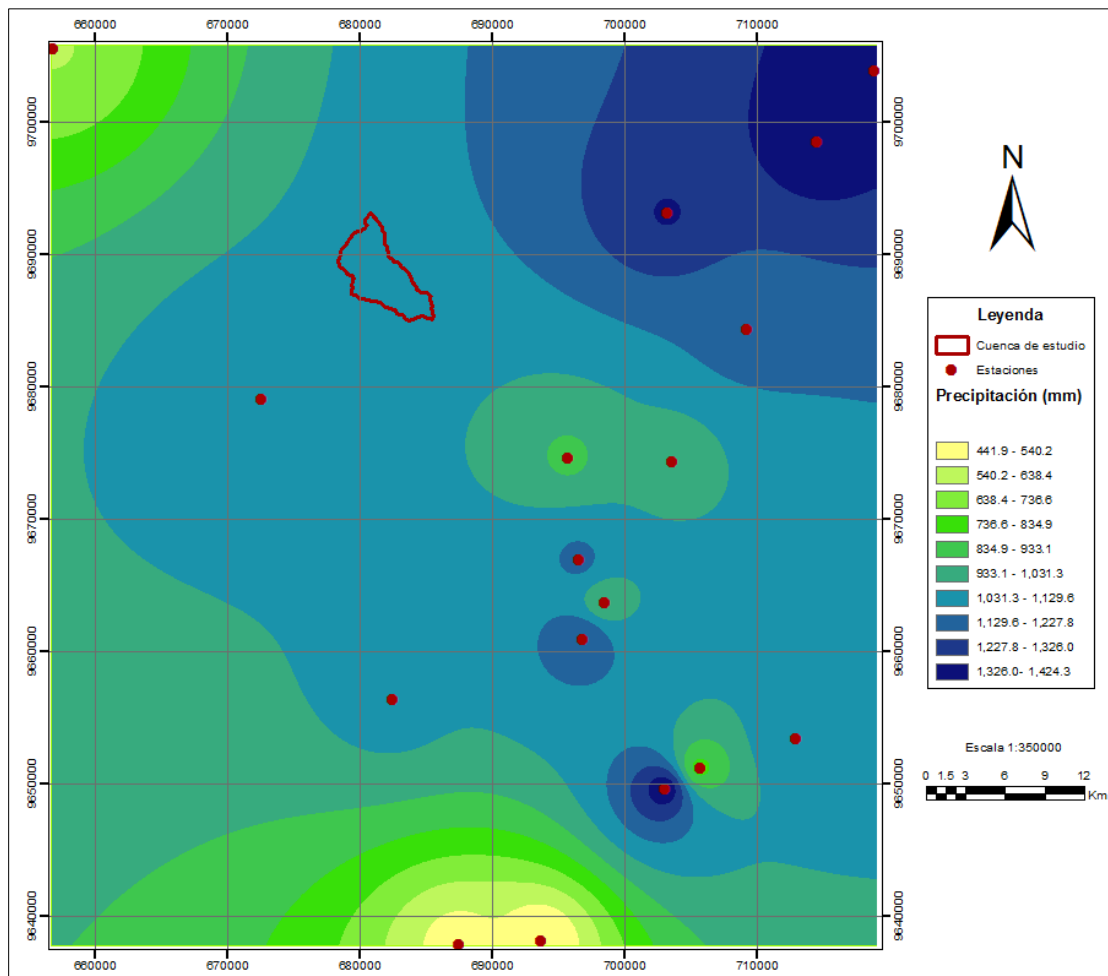


Figura 3.4 Precipitación media anual para la región

De acuerdo al mapa de isoyetas de la Figura 3.4, la precipitación promedio anual varía de 440 mm en las zonas más bajas debido a que están influenciadas por el régimen occidental, hasta 1400 mm en las zonas más altas, afectadas por el clima frío del páramo. La precipitación media total resulta de 930 mm.

Se puede apreciar que la microcuenca del río El Chorro se ubica en una zona de menor variabilidad, en el rango de 1030 a 1130 mm anuales. Esto no ocurre para las zonas más cercanas a la región Costa donde hay mayor variabilidad, con más de 500 mm de diferencia.

3.4.1.2. Variación temporal

En la Figura 3.5 se muestran los diagramas de correlación de las precipitaciones mensuales de cada estación, graficadas en base a la información de la Tabla 3.5.

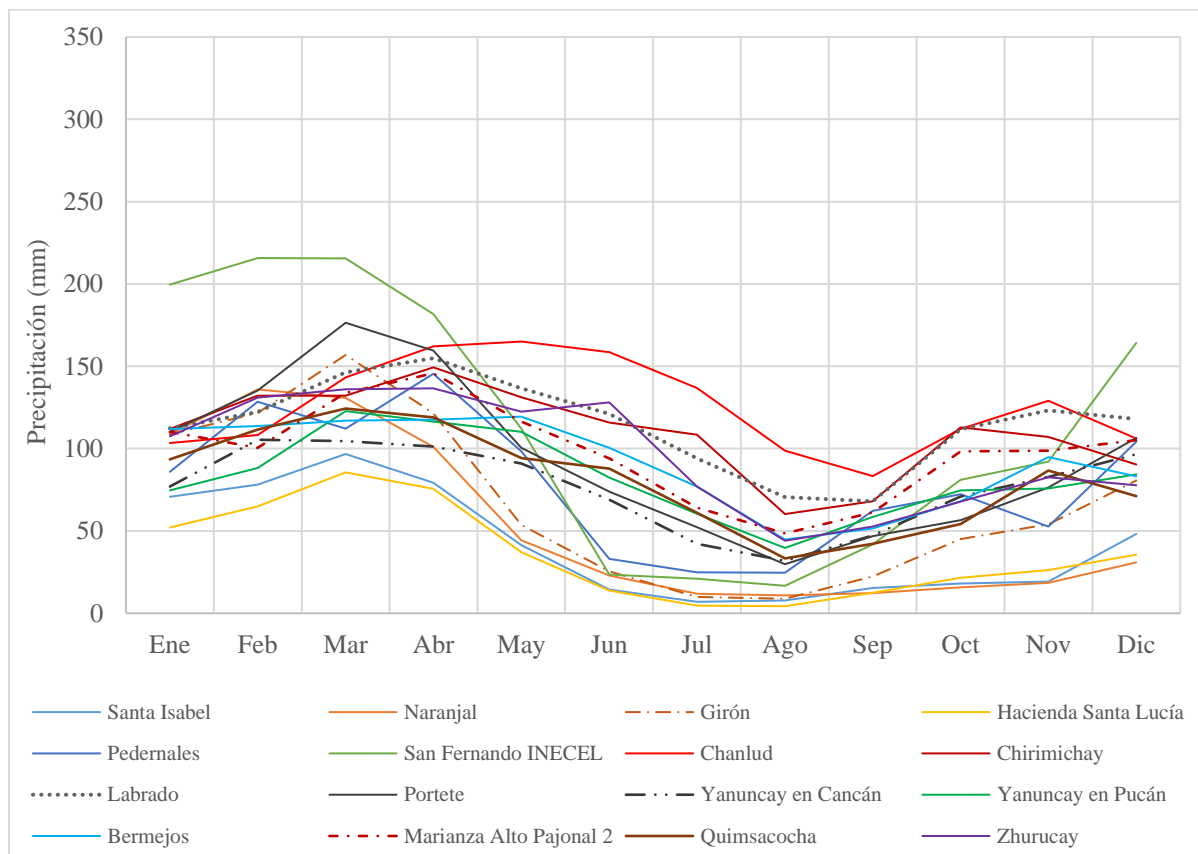


Figura 3.5 Variación mensual de la precipitación en las diferentes estaciones meteorológicas

Se puede observar que las precipitaciones registradas a cotas mayores de 2000 msnm siguen un régimen bimodal, el cual se caracteriza por tener dos picos de invierno. Generalmente, ocurren precipitaciones altas en los primeros meses del año, especialmente de marzo a abril, con lluvias bajas de julio a septiembre y nuevamente se incrementa en el resto del año. En cambio, las precipitaciones medidas a cotas menores a 2000 msnm, como es el caso de las estaciones Santa Isabel, Naranjal y Hacienda Santa Lucía, siguen un régimen unimodal, donde solo se registra un pico de invierno. Esto se debe a que están influenciadas por el clima tropical del Pacífico y por lo tanto se pueden apreciar las dos épocas marcadas de invierno y verano, características de la zona costera.

Tabla 3.5 Precipitaciones promedio mensuales de las estaciones usadas en el estudio (mm)

Nombre estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Santa Isabel	71	78	97	79	41	14	7	8	15	18	19	48
Naranjal	109	136	131	101	44	23	12	11	12	16	18	31
Girón	109	122	157	121	54	25	10	9	22	45	54	81
Hacienda Santa Lucía	52	65	86	76	37	14	5	4	12	22	26	36
Pedernales	86	128	112	145	98	33	25	25	62	72	53	104
San Fernando INECEL	200	216	216	182	112	24	21	17	42	81	92	164
Chanlud	103	108	143	162	165	159	137	99	83	112	129	106
Chirimichay	112	132	132	149	131	116	108	60	68	113	107	90
Labrado	112	122	146	155	137	121	94	71	68	112	123	118
Portete	110	135	176	160	100	74	52	30	47	57	76	107
Yanuncay en Cancán	77	105	105	101	91	69	42	32	47	71	83	97
Yanuncay en Pucán	75	88	123	116	110	82	61	40	58	75	76	84
Bermejos	122	172	308	185	111	42	34	7	16	33	12	64
Marianza Alto Pajonal 2	112	114	117	118	119	100	77	45	51	68	95	83
Quimsacocha	110	100	134	146	117	94	64	49	61	98	99	105
Zhurucay	93	111	124	119	94	88	61	33	42	54	87	71

3.4.2. Variación espacial y temporal de la temperatura

3.4.2.1. Variación espacial

En la Tabla 3.6 se presenta la temperatura promedio anual y la elevación de cinco estaciones con información de temperatura, con las cuales se determinó una curva lineal que relaciona estas dos variables, la cual se muestra en la Figura 3.6.

Tabla 3.6 Temperatura promedio anual y elevación de cinco estaciones con información de temperatura

Estación	Tipo	Elevación (m s.n.m)	Temperatura promedio anual (°C)
Santa Isabel	CO	1550	19.5
Naranjal	CO	50	25.4
Chaucha	CO	1896	16.6
Migüir DJ Luspa	LM	3624	7.8
Quimsacocha	CO	3762	6.3

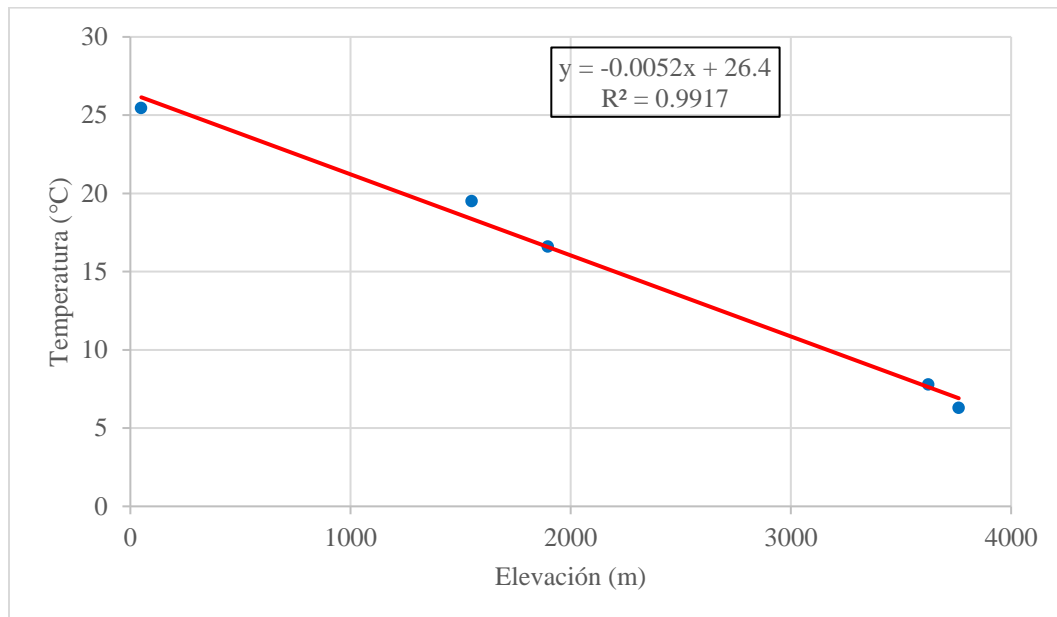


Figura 3.6 Diagrama de correlación de la temperatura vs elevación de cinco estaciones con información de temperatura. Se muestra el ajuste lineal y la ecuación de ajuste

De acuerdo a la Figura 3.6, se observa que existe una buena correlación lineal entre la temperatura y cota, obteniéndose un $R=0.99$. Esta curva muestra que la temperatura disminuye linealmente conforme aumenta la elevación, variando $0.52\text{ }^{\circ}\text{C}$ por cada 100 m ; es decir, tiene un gradiente altitudinal de -0.0052 . Lo anterior concuerda con los estudios de Bacuilima et al. (1999) y Rossenaar y Hofstede (1992) citado en (W Buytaert et al., 2010). La variabilidad espacial de la temperatura se puede visualizar con mayor claridad en el mapa de isotermas de la Figura 3.7.

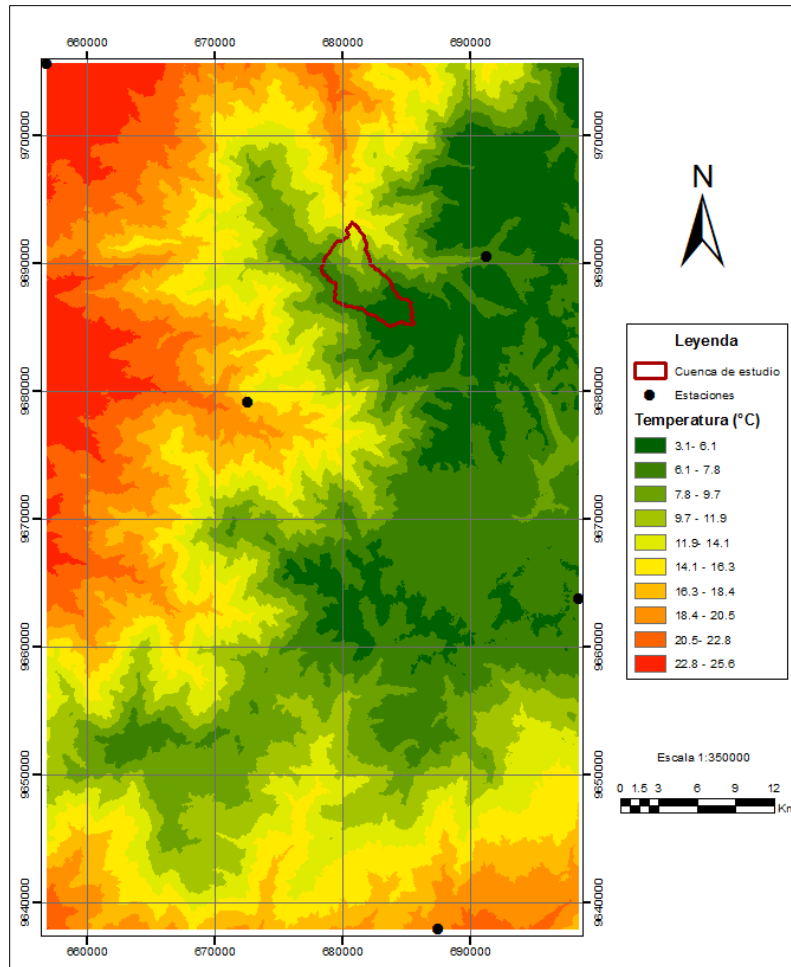


Figura 3.7 Mapa de isotermas de la temperatura anual para la región de estudio.

Se puede apreciar que la temperatura media anual de la región varía entre 3.1 y 25.6 °C y tiene un valor promedio de 14.4 °C. Esta diferencia de temperatura se debe a que se utilizaron para la investigación estaciones ubicadas en las regiones Costa y Sierra, y por ende existe un amplio rango altitudinal que genera mayor variabilidad.

Se puede observar que la microcuenca de estudio está influenciada por ambos regímenes (Costa y Sierra), con temperaturas anuales de entre 3 y 15 °C aproximadamente.

3.4.2.2. Variación temporal

A continuación, se muestra la variación mensual de la temperatura a nivel regional en la Figura 3.8, caracterizada en base a la información de la Tabla 3.6, donde se encuentra la temperatura mensual promedio de las cinco estaciones con información de temperatura.

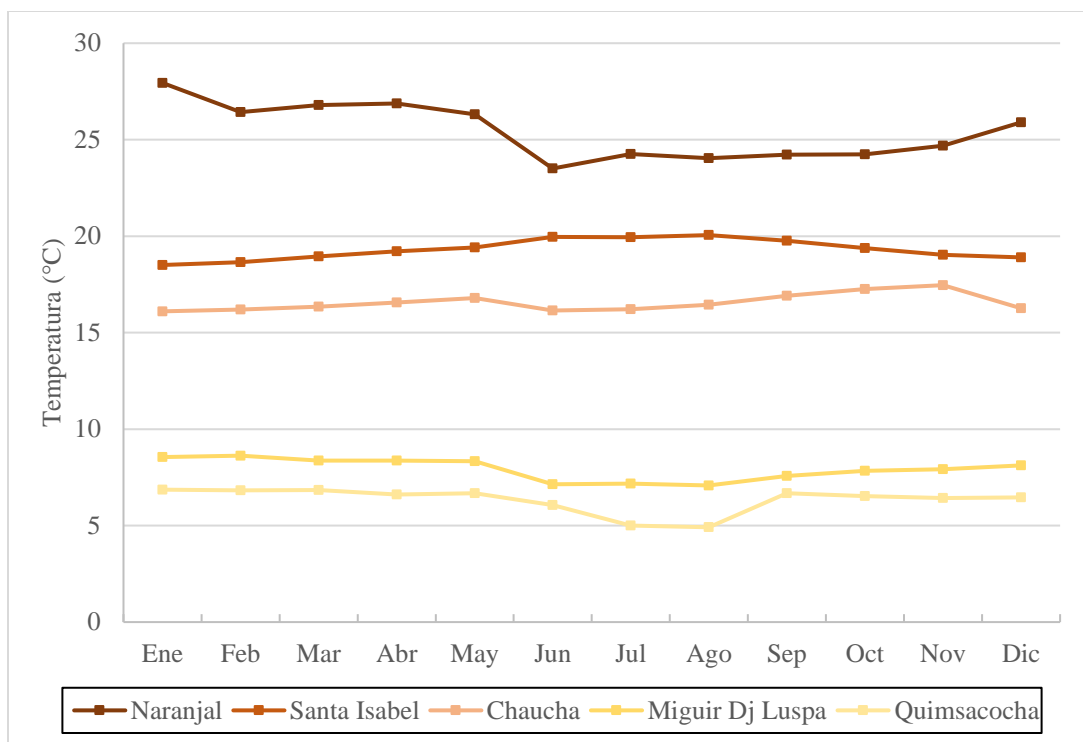


Figura 3.8 Variación mensual de la temperatura de cinco estaciones usadas en el estudio

Tabla 3.7 Temperatura promedio mensual de cinco estaciones usadas en el estudio (° C)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Santa Isabel	18.51	18.66	18.95	19.21	19.41	19.96	19.95	20.06	19.76	19.39	19.03	18.91
Naranjal	27.94	26.43	26.80	26.87	26.31	23.51	24.25	24.04	24.23	24.25	24.69	25.89
Chaucha	16.11	16.20	16.35	16.56	16.79	16.14	16.21	16.45	16.91	17.25	17.46	16.26
Miguir DJ Luspa	8.55	8.63	8.37	8.36	8.33	7.15	7.17	7.08	7.57	7.84	7.92	8.12
Quimsacocha	6.86	6.83	6.84	6.60	6.67	6.06	5.00	4.91	6.68	6.53	6.43	6.46
Promedio	15.59	15.35	15.46	15.52	15.50	14.56	14.52	14.51	15.03	15.05	15.11	15.13

En cuanto a la variación temporal de la temperatura, se puede observar en la Figura 3.8 que ésta varía muy poco en comparación con la precipitación. La temperatura es mayor en los primeros meses del año, posteriormente disminuye en los meses de junio a agosto y finalmente vuelve a incrementar casi como al inicio del año. Esta tendencia difiere para la estación Santa Isabel, donde la temperatura al inicio es menor y luego incrementa.

En la Tabla 3.7 se puede apreciar que la temperatura mensual más baja es de 4.91°C registrada en la estación Quimsacocha en agosto, y la más alta es de 27.94 °C de la estación Naranjal en enero. En promedio, la temperatura mensual a nivel regional está alrededor de 15°C.

Al comparar con la variabilidad temporal de las precipitaciones, se observa que en la época lluviosa la temperatura también es mayor y en la temporada de verano, la temperatura disminuye.

3.5. Caudales de la microcuenca del río El Chorro

3.5.1. Serie de niveles corregida de la estación Migüir D.J. Luspa

En la Figura 3.9 se presentan las series de niveles de 2 años, original y corregida de la estación Migüir D.J. Luspa, con las cuales se obtuvieron los caudales respectivos para la microcuenca del río El Chorro, mostrados más adelante.

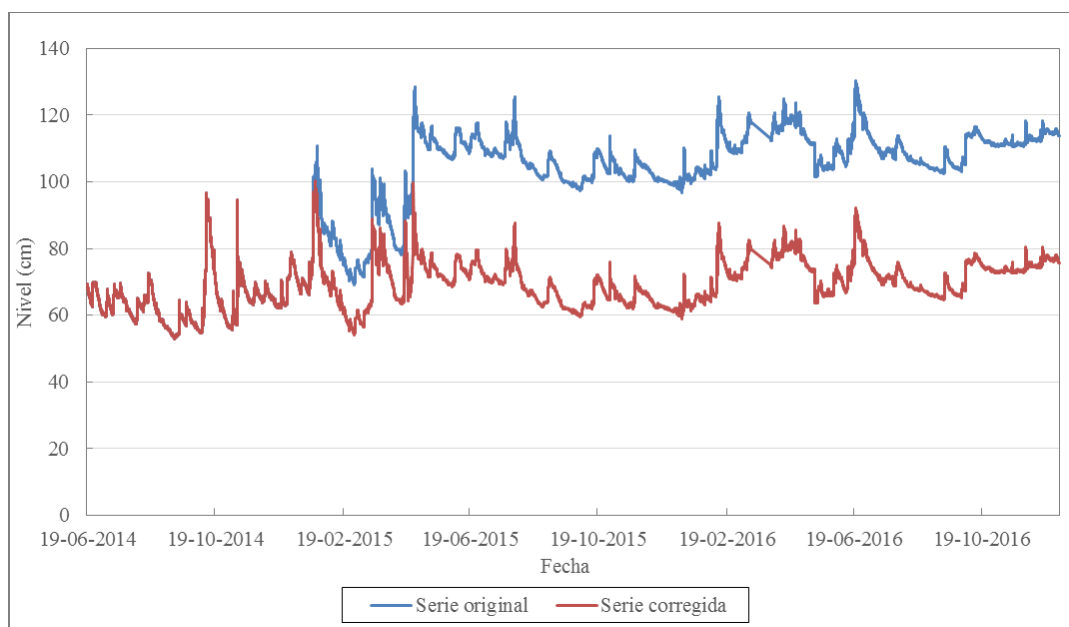


Figura 3.9 Serie de niveles original (azul) y corregida (rojo) de la estación Migüir D.J. Luspa

Como se puede observar, a partir de enero de 2015 el nivel sube un poco más de lo registrado anteriormente, y después de la tormenta el nivel tampoco disminuye en comparación con el primer año de registro. Posteriormente, en abril del mismo año se produce un cambio aún más brusco y después el nivel se mantiene mucho más alto. Con ello se puede notar claramente que existieron problemas en la medición, causados posiblemente por un daño en el sensor, error técnico, acumulación de sedimentos, etc.

Hay que tomar en cuenta que la estación está ubicada en una cota alta, donde generalmente los ríos aún son pequeños y no se espera tener niveles muy altos. Debido a que el desfase en el registro es evidente, se pudo realizar una corrección visual. Sin embargo, se debería verificar las posibles fuentes del error.

Finalmente, se obtuvo el limnigrama corregido que se presenta en rojo. De acuerdo a esto, el río Migüir presenta un nivel medio de 70 cm aproximadamente en la sección de control.

3.5.2. Curva de descarga de la microcuenca del río Migüir

Con los aforos realizados por ETAPA EP en la estación Migüir D.J. Luspa mostrados en la Tabla 3.8 y el punto adicional seleccionado de acuerdo a la serie de niveles mostrado en la Tabla 3.9, se obtuvo una curva de descarga asumida para el río Migüir y su respectiva ecuación que se muestra en la Figura 3.10.

Tabla 3.8 Resultados de los aforos realizados por ETAPA EP. Se indica fecha y punto de aforo, coordenadas y caudal registrado.

Fecha aforo	Estación aforo	X (m)	Y (m)	Cota (ms.n.m.)	Q (m ³ /s)
14/11/2014 12:00	Migüir	691221	9690512	3624	0.658
3/6/2015 12:35	Migüir	691221	9690512	3624	0.439

Tabla 3.9 Datos utilizados para la obtención de la curva de descarga

Fecha de aforo	Q (m ³ /s)	H (cm)*
14/11/2014 12:00	0.658	73.27
3/6/2015 12:35	0.439	69.69
Aforo adicional	0.220	50.00

* Obtenido de la serie de niveles

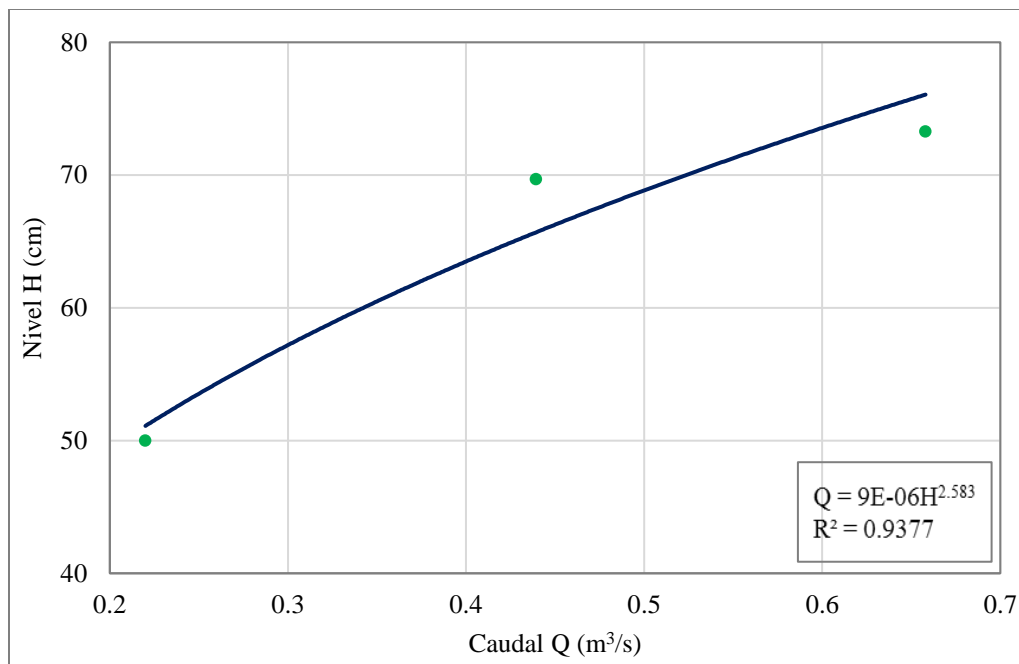


Figura 3.10 Ecuación y curva de descarga del río Migüir.

Se observa que el ajuste potencial aplicado a los datos concuerda con el comportamiento de los mismos, obteniéndose un $R=0.968$. De ser el caso y en función a la información disponible se puede realizar otro tipo de ajuste.

La ecuación obtenida ha permitido estimar los caudales medios diarios en la estación Migüir D.J. Luspa; sin embargo, se recomienda realizar nuevos aforos para calibrar y mejorar la ecuación empleada.

3.5.3. Transposición de caudales

La delimitación y las características morfométricas de la microcuenca del río Migüir en la estación Migüir D.J. Luspa, se muestran en la Figura 3.11 y Tabla 3.10, respectivamente.

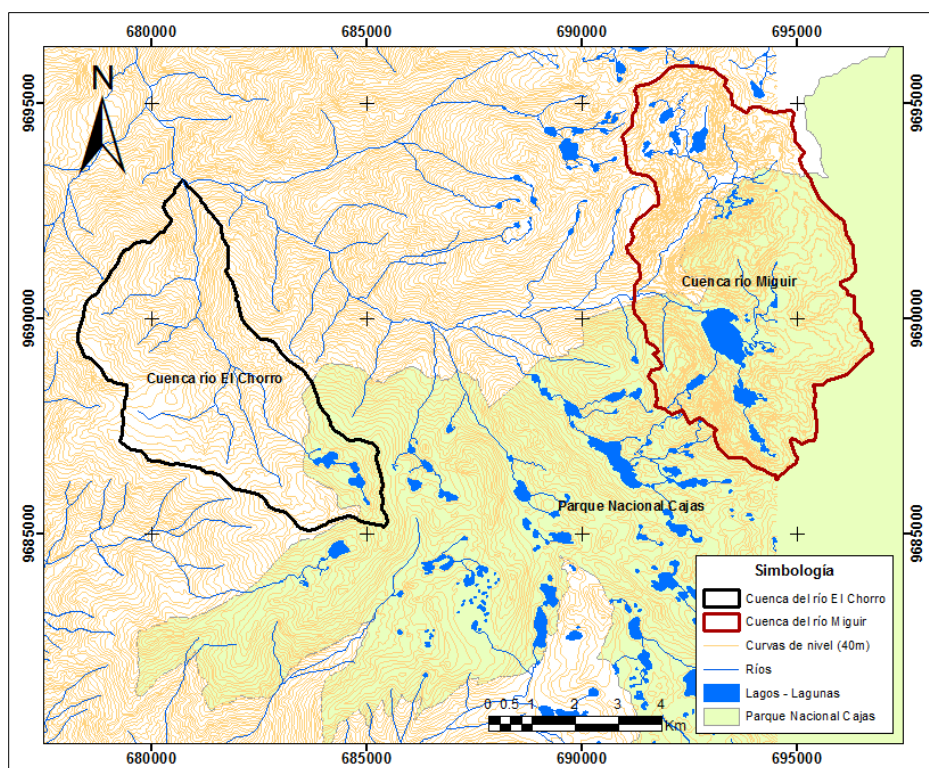


Figura 3.11 Delimitación de la microcuenca del río Miguir.

Tabla 3.10 Características morfométricas de la microcuenca del río Miguir.

Parámetros morfométricos	
Área (km ²)	35.77
Perímetro (km)	29.19
Cota máx (msnm)	4487
Cota mín (msnm)	3610
Desnivel altitudinal (m)	877

Se observa que la microcuenca del río Miguir tiene mayor superficie que la microcuenca del río El Chorro y también una red hidrográfica más grande; sin embargo, presenta una similitud hidrológica muy semejante. Con esto se espera que la respuesta hidrológica del río El Chorro sea igual en comportamiento con caudales algo menores a la de Miguir.

A partir del mapa regional de isoyetas (Figura 3.4), la precipitación media anual aproximada para la microcuenca del río El Chorro y la microcuenca del río Miguir es de 1070 mm y 1150 mm respectivamente. Existe una diferencia de 80 mm que representa el 7%, por lo que se pudo asumir, para obtener resultados conservadores, que las precipitaciones eran las mismas para

ambas microcuencas. En la Figura 3.12 se presentan los caudales medios diarios resultantes de la transposición para la microcuenca en investigación.

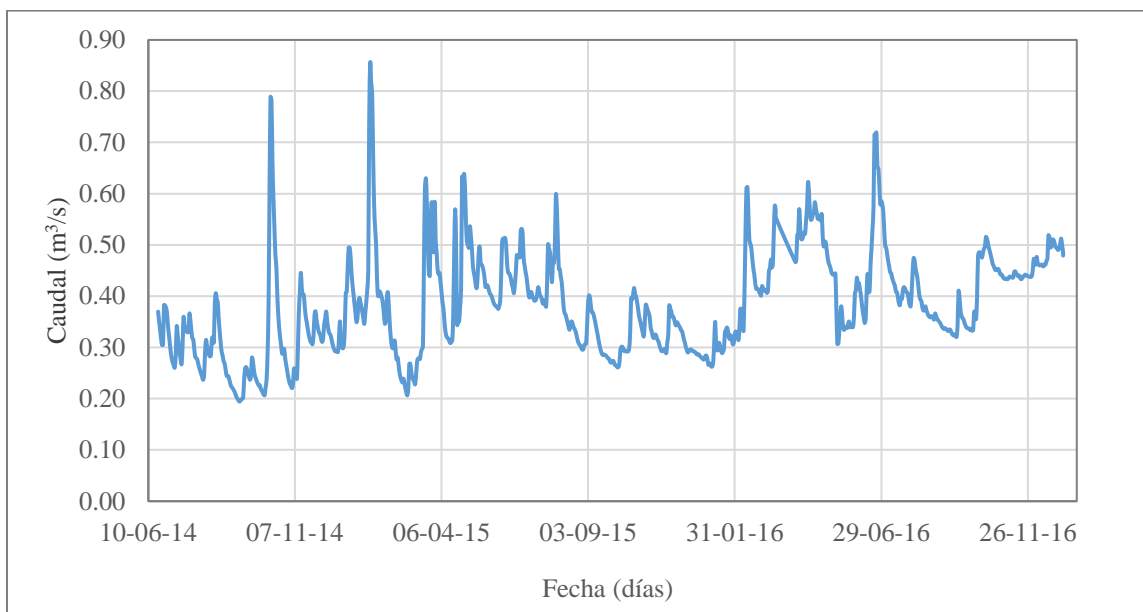


Figura 3.12 Hidrograma de los caudales medios diarios del río El Chorro.

Del hidrograma de los dos últimos años se establece que el caudal máximo diario es de 0.85 m³/s, el mínimo 0.20 m³/s y el caudal promedio 0.38 m³/s. Además, para el caudal máximo y mínimo los niveles de agua que se registran son de 94.8 cm y 53.5 cm, respectivamente, obtenidos de la hoja de cálculo.

Con la serie de caudales obtenidos se ha tratado de estimar el comportamiento de la microcuenca; sin embargo, se requiere que se realicen aforos para validar la información. A pesar de ello, estos caudales obtenidos son confiables y pueden ser utilizados para futuras investigaciones.

3.6. Análisis hidrológico de la microcuenca del río El Chorro

3.6.1. Precipitación y temperatura promedio

En la Figura 3.13 se muestra el mapa de isoyetas anuales y para el periodo de retorno de 25 años de la microcuenca del río El Chorro. Además, en la Figura 3.14 se presenta el mapa de isotermas para la microcuenca.

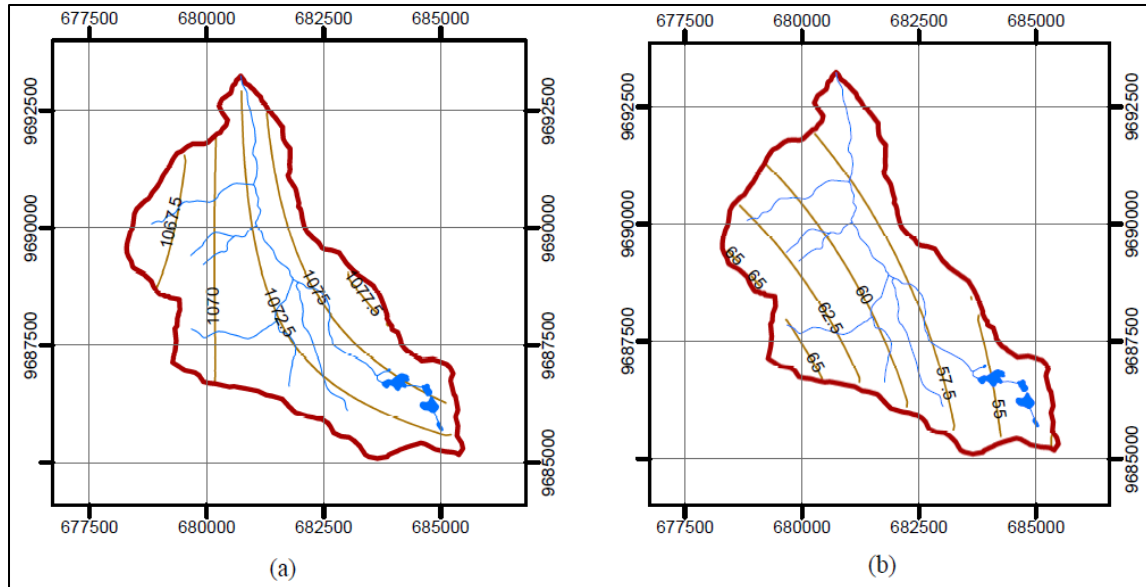


Figura 3.13 Isolíneas: (a) Precipitación media anual y (b) Precipitación máxima para $Tr=25$ años para el río El Chorro.

Se observa que la precipitación anual varía entre 1065 y 1077 mm con un valor promedio de 1070 mm. Este valor es muy similar al establecido para el Parque Nacional Cajas (1072 mm) según Guzmán (2004) citado en (J. Tapia, 2016). Por otro lado, la precipitación máxima en 24 horas para el periodo de retorno de 25 años varía entre 50 y 67.5 mm y su valor promedio es de 58.7 mm.

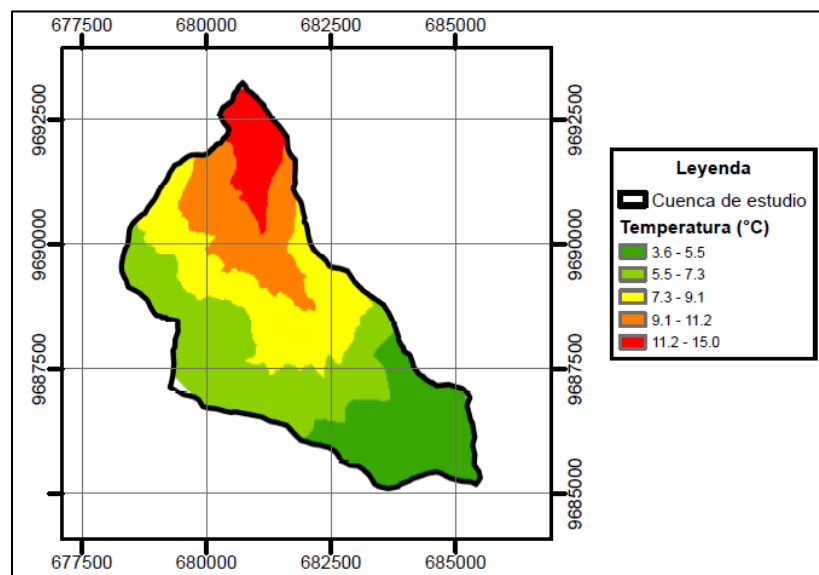


Figura 3.14 Temperatura media anual para el río El Chorro.

De acuerdo al mapa de temperaturas medias anuales para la microcuenca de la Figura 3.14, la temperatura varía entre 3.6 y 15.0°C con un valor promedio de 9.3°C.

3.6.2. Hietograma de diseño

En la Tabla 3.11 se presentan las precipitaciones del evento de lluvia máxima de 1.5 horas para el periodo de retorno de 25 años y discretizado cada 5 minutos, las cuales fueron obtenidas a partir de la información de la estación Labrado (Anexo 3.3). A partir de estos datos, se graficó el hietograma para la microcuenca del río El Chorro mostrado en la Figura 3.15.

Tabla 3.11 Precipitación cada 5 minutos, para una duración de 1.5 horas y periodo de retorno de 25 años de la microcuenca del río El Chorro

Tiempo (min)	Precipitación (mm)	Hietograma (mm)
5	6.065	0.540
10	3.392	0.771
15	3.264	0.797
20	3.264	0.899
25	3.161	1.028
30	2.673	1.131
35	1.927	2.673
40	1.131	3.264
45	0.797	3.392
50	0.797	6.065
55	0.668	3.264
60	0.771	3.161
65	0.822	1.927
70	1.131	1.131
75	0.977	0.977
80	1.028	0.822
85	0.899	0.797
90	0.540	0.668
33.305		

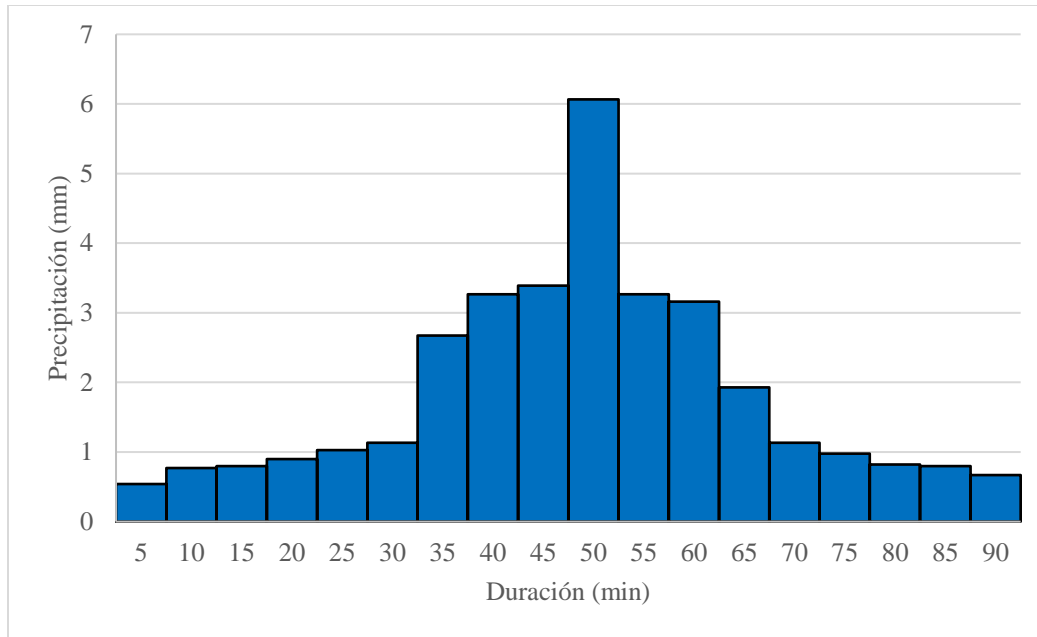


Figura 3.15 Hietograma de lluvia máxima de 1.5 horas de duración, en intervalos de 5 minutos, para T=25 años, de la microcuenca del río El Chorro

Se eligió la duración de 1.5 horas debido a que el tiempo de concentración es aproximadamente 30 minutos y es conveniente elegir una duración 2 o 3 veces mayor a éste para considerar y permitir que se generen los procesos hidrológicos que intervienen en el escurrimiento como la infiltración, humedad antecedente y condiciones de saturación previa del suelo. Se puede observar que la intensidad de la precipitación va disminuyendo conforme transcurre el tiempo, al igual que la diferencia entre cada intervalo, siendo la intensidad máxima igual a 72mm/h para 5 min.

3.6.3. Caudal base, mínimo y medio

En la Tabla 3.12 se presenta la frecuencia de cada intervalo de caudal, desde el máximo de 0.825 m³/s hasta el mínimo de 0.188 m³/s obtenidos de la serie de caudales diarios de la microcuenca de estudio. Con estos datos se elaboró la curva de duración de caudales para la microcuenca del río El Chorro mostrada en la Figura 3.16.

Tabla 3.12 Frecuencia absoluta y relativa acumulada (FAA, FRA) para los diferentes intervalos de caudal

Intervalos de caudal	Frecuencia	FAA	FRA (%)
0.825			
0.750	5	5	0.549
0.600	12	17	1.868
0.550	23	40	4.396
0.500	37	77	8.462
0.480	33	110	12.088
0.450	60	170	18.681
0.430	55	225	24.725
0.400	88	313	34.396
0.380	75	388	42.637
0.350	83	471	51.758
0.330	78	549	60.330
0.320	56	605	66.484
0.300	67	672	73.846
0.280	90	762	83.736
0.250	76	838	92.088
0.230	28	866	95.165
0.200	34	900	98.901
0.188	10	910	100.000

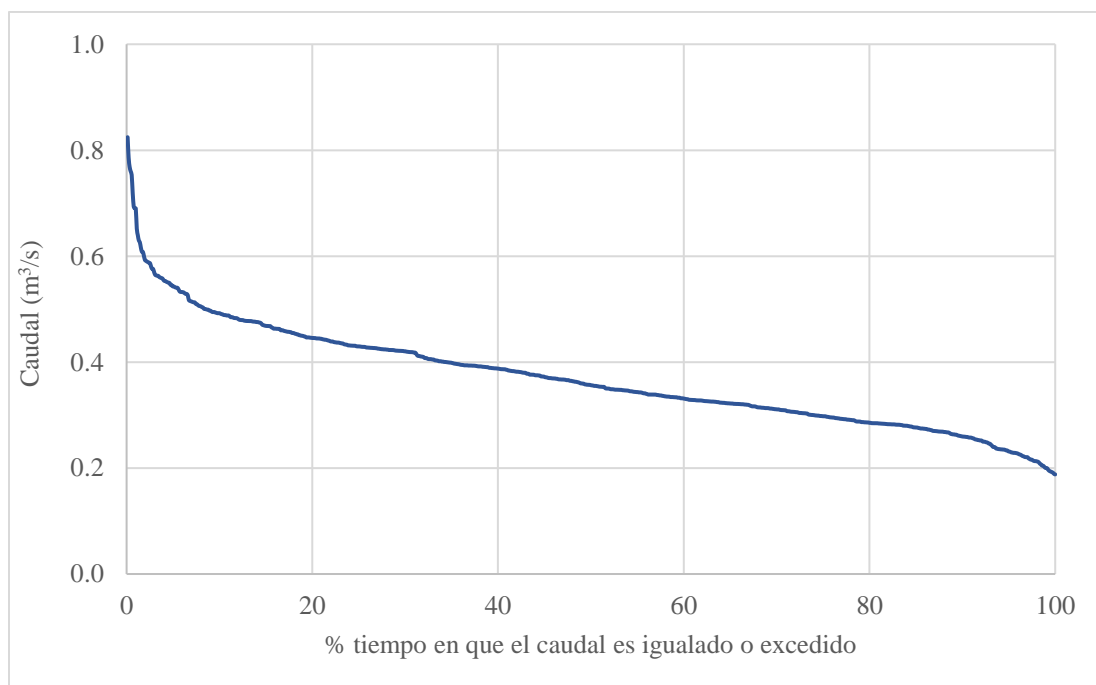


Figura 3.16 Curva de duración de caudales de la microcuenca del río El Chorro

La forma de la curva es propia de una microcuenca de páramo, con una gran capacidad de autoregulación y con caudales pico moderados. Esto muestra que la microcuenca de estudio mantiene gran cantidad de vegetación y zonas protegidas o que no han sido manipuladas por el hombre, principalmente por encontrarse en una zona alejada.

El caudal base del río El Chorro tomado como aquel que permanece el 75% del tiempo es de aproximadamente $0.300 \text{ m}^3/\text{s}$, el cual es menor al caudal medio de $0.370 \text{ m}^3/\text{s}$. En contraste, el caudal base para diseño del evento torrencial usado en la modelación en HEC-HMS, es de $0.430 \text{ m}^3/\text{s}$, tomado como el caudal que se mantiene el 25% del tiempo.

El caudal mínimo de la serie disponible es $0.188 \text{ m}^3/\text{s}$; sin embargo este valor no se puede asumir para la fuente debido a que el periodo de registros es muy corto. Por otro lado, la diferencia entre el caudal máximo y el caudal medio es menor de 2 a 1, lo que indica que no hay variaciones bruscas de caudal. Finalmente, el caudal que se produce al menos el 90% del tiempo es de $0.250 \text{ m}^3/\text{s}$; es decir, es una fuente con un caudal alto constante que puede ser aprovechado aguas abajo.

3.6.4. Caudal ecológico

En la Tabla 3.13 se presentan los caudales ecológicos obtenidos para cada mes como el 10% del caudal medio mensual de la microcuenca del río El Chorro, mostrados gráficamente en la Figura 3.17.

Tabla 3.13 Caudales mensuales, promedio y ecológico de la microcuenca del río El Chorro (m^3/s)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2014						0.334	0.293	0.283	0.221	0.330	0.309	0.322
2015	0.446	0.297	0.352	0.399	0.426	0.440	0.411	0.345	0.302	0.319	0.319	0.292
2016	0.292	0.409	0.454	0.524	0.374	0.470	0.412	0.362	0.330	0.442	0.424	0.466
Q prom	0.369	0.353	0.403	0.461	0.400	0.415	0.372	0.330	0.284	0.363	0.351	0.360
Q ecológico	0.037	0.035	0.040	0.046	0.040	0.041	0.037	0.033	0.028	0.036	0.035	0.036

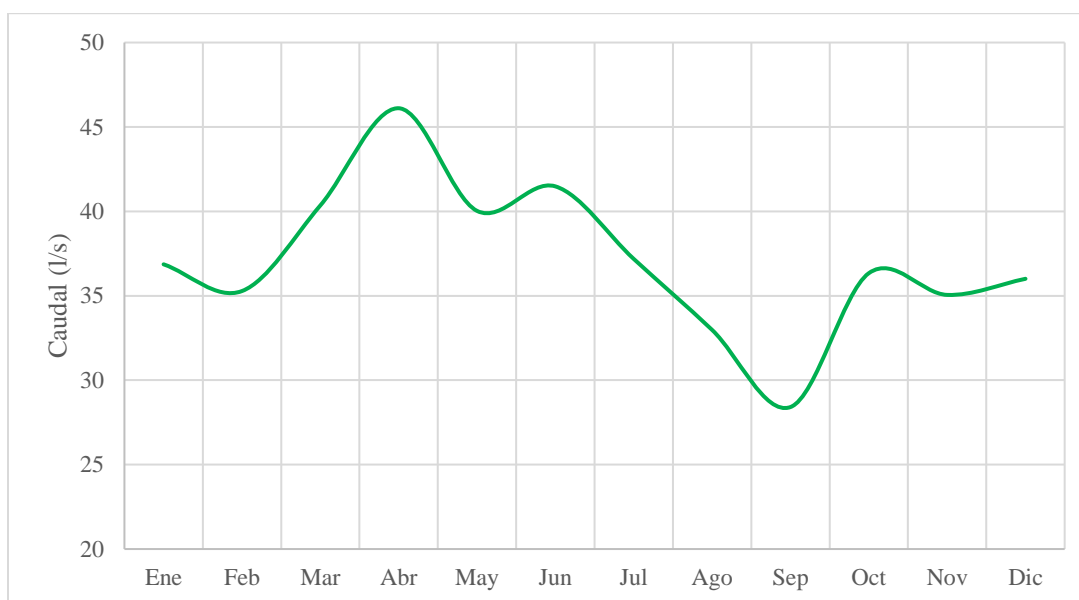


Figura 3.17 Caudal ecológico mensual de la microcuenca del río El Chorro

El caudal medio mensual varía entre $0.28 \text{ m}^3/\text{s}$ en septiembre hasta $0.46 \text{ m}^3/\text{s}$ en el mes de abril, siguiendo la misma tendencia que las precipitaciones. De la misma manera, el caudal ecológico deseado varía entre 28 l/s y 46 l/s en los mismos meses. Este régimen de caudales es suficiente tomando en cuenta que la microcuenca es pequeña, y asegura la supervivencia de las especies acuáticas (macroinvertebrados).

3.6.5. Caudal máximo de diseño

A continuación se presenta el cálculo del número de curva (Tabla 3.14) para la obtención del hidrograma de diseño de la microcuenca del río El Chorro (Figura 3.18). El número de curva se obtuvo en función del mapa de cobertura del suelo del SIGTIERRAS (Anexo 2.1).

3.6.5.1. Cálculo del número de curva (NC)

Tabla 3.14 Cálculo del número de curva (NC) para la microcuenca del río El Chorro. Se muestra la cobertura, su área de ocupación y el número de curva de cada cobertura

Cobertura	Área (Ha)	%	NC
Vegetación Herbácea	83.4	3.12	60
Vegetación Arbustiva	189.0	7.07	60
Páramo (vegetación herbácea de altura)	1745.5	65.33	58
Plantación Forestal (pino)	1.4	0.05	68
Erial (Afloramiento rocoso o zona erosionada)	449.2	16.81	82
Pastizal	188.7	7.06	72
Área Poblada	9.1	0.34	82
Cuerpo Agua	5.4	0.20	85
NC ponderado			63.4

De acuerdo a la Tabla 3.14, más del 65% de la microcuenca del río El Chorro está cubierta por páramo. Adicionalmente, un 17% está constituido por afloramientos rocosos ubicados en la parte alta de la microcuenca, donde la temperatura es más baja y existe muy poca vegetación. El resto de la microcuenca está cubierta por vegetación nativa y arbustos, pastizales, algunos cuerpos de agua que pueden ser lagunas (sin tomar en cuenta las quebradas y ríos) y muy pocos asentamientos humanos.

Como resultado, el número de curva es de 63.4, el cual es bajo y similar a los obtenidos para otras microcuencas de páramo (Coello, 2015). Esto se debe a que la mayoría de la zona está cubierta por vegetación endémica y aparentemente no hay afecciones debidas a acciones antrópicas como cambios en el uso del suelo. Así mismo, este valor del NC indica que hay una importante capacidad de almacenamiento del agua y por ende se espera que los caudales pico no sean elevados.

3.6.5.2. Hidrograma de crecida obtenido en HEC-HMS aplicando el método SCS

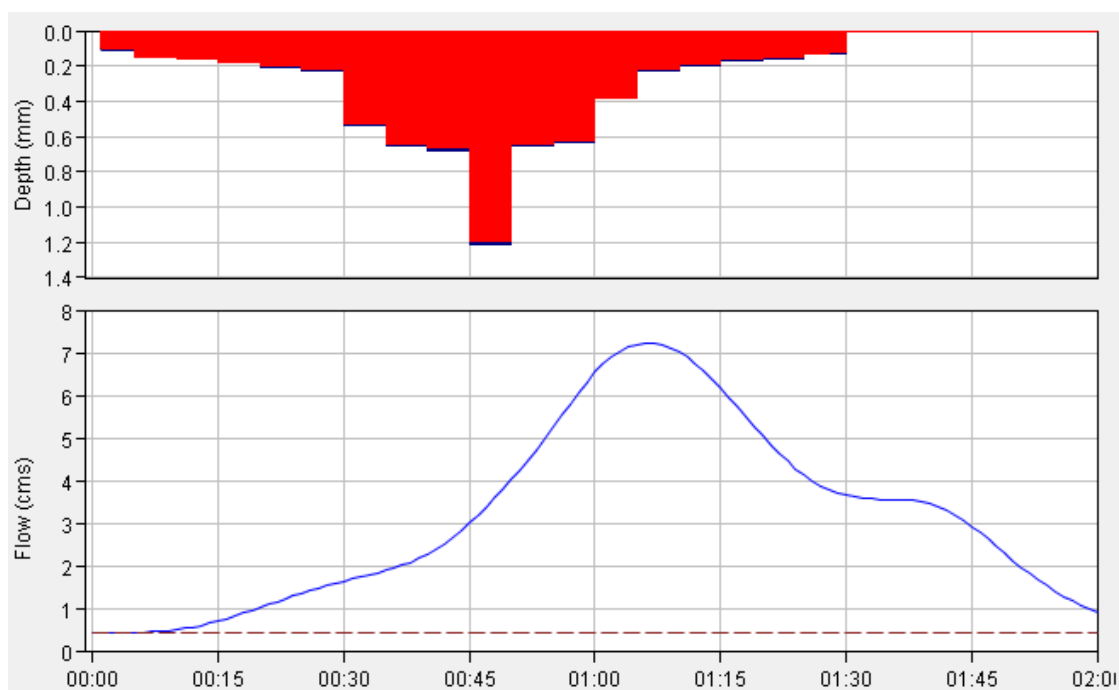


Figura 3.18 Hidrograma de precipitación efectiva e hidrograma de crecida para el periodo de retorno de 25 años, en intervalos de 1 minuto y 2 horas de duración, de la microcuenca del río El Chorro (El Chorro A.J. Migüir)

En el hidrograma de crecida resultante para el río El Chorro se puede observar que el caudal pico se produce a 1 hora 5 minutos aproximadamente luego de iniciada la precipitación efectiva. El valor máximo de precipitación efectiva cada 5 minutos es de 1.2 mm; es decir, de los 6.06 mm de precipitación total máxima en 5 minutos (Tabla 3.11), 1.2 mm contribuyen a la escorrentía superficial y el restante de 4.86 mm constituyen las pérdidas iniciales.

El caudal pico obtenido para la microcuenca en estudio para el periodo de retorno de 25 años es de 7.2 m³/s, con el cual se diseñará una estructura de control y monitoreo.

3.7. Diseño de la red hidrometeorológica

La red hidrometeorológica resultante de la presente investigación, está conformada por 8 puntos de medición. Se ubicaron 2 estaciones climatológicas, 2 pluviográficas y 4 estructuras hidráulicas

para el monitoreo de los caudales. A continuación se describen dónde están localizadas y los criterios empleados.

3.7.1. Ubicación de estaciones hidrológicas y climatológicas

Las estaciones climatológicas se colocaron, una en la parte alta de la microcuenca y la otra en la parte baja considerando que variables como la temperatura, la humedad, entre otras, varían según el gradiente altitudinal. Adicionalmente, estas estaciones también registran la precipitación.

Las estaciones pluviográficas, de igual manera se han ubicado de acuerdo a los criterios técnicos. Una de las estaciones pluviográficas se colocó próxima a la Quebrada río Blanco, ya que está en un área de minería que ha generado mucha controversia debido a la posible afección a los recursos naturales como son al agua y al suelo, situación que está bajo investigación por parte de las Universidades de la ciudad de Cuenca. La segunda estación se ha colocado en la parte alta de la microcuenca, intermedia entre la estación en río Blanco y la estación climatológica.

3.7.2. Ubicación y diseño de estructuras hidráulicas

Los puntos de control hidrológico de la microcuenca, se seleccionaron de acuerdo a la importancia ambiental, hidrológica y social de las diferentes fuentes. Se colocó una en la microcuenca del río Blanco, por ser una zona de alto interés ambiental y económico, otra a la salida de la microcuenca de estudio y dos estructuras adicionales sobre el río El Chorro, en las juntas de los afluentes principales. Con ello se pretende tener un monitoreo completo de toda la microcuenca. A continuación se describen la ubicación de estos puntos de control y el diseño de los canales Parshall.

3.7.2.1. Ubicación y delimitación de microcuencas

En la Figura 3.19 se presenta la delimitación de las microcuencas dentro de la microcuenca del río El Chorro, donde estarán ubicadas las estructuras de control. Se optó por colocar 3 canales Parshall a la salida de cada microcuenca y uno a la salida de la microcuenca de estudio: Blanco

A.J. El Chorro, El Chorro D.J. Yantahuaycu, El Chorro D.J. Taruga Pamba y El Chorro A.J. Migüir. Con esto se espera poder monitorear los caudales de toda la microcuenca y especialmente del río Blanco.

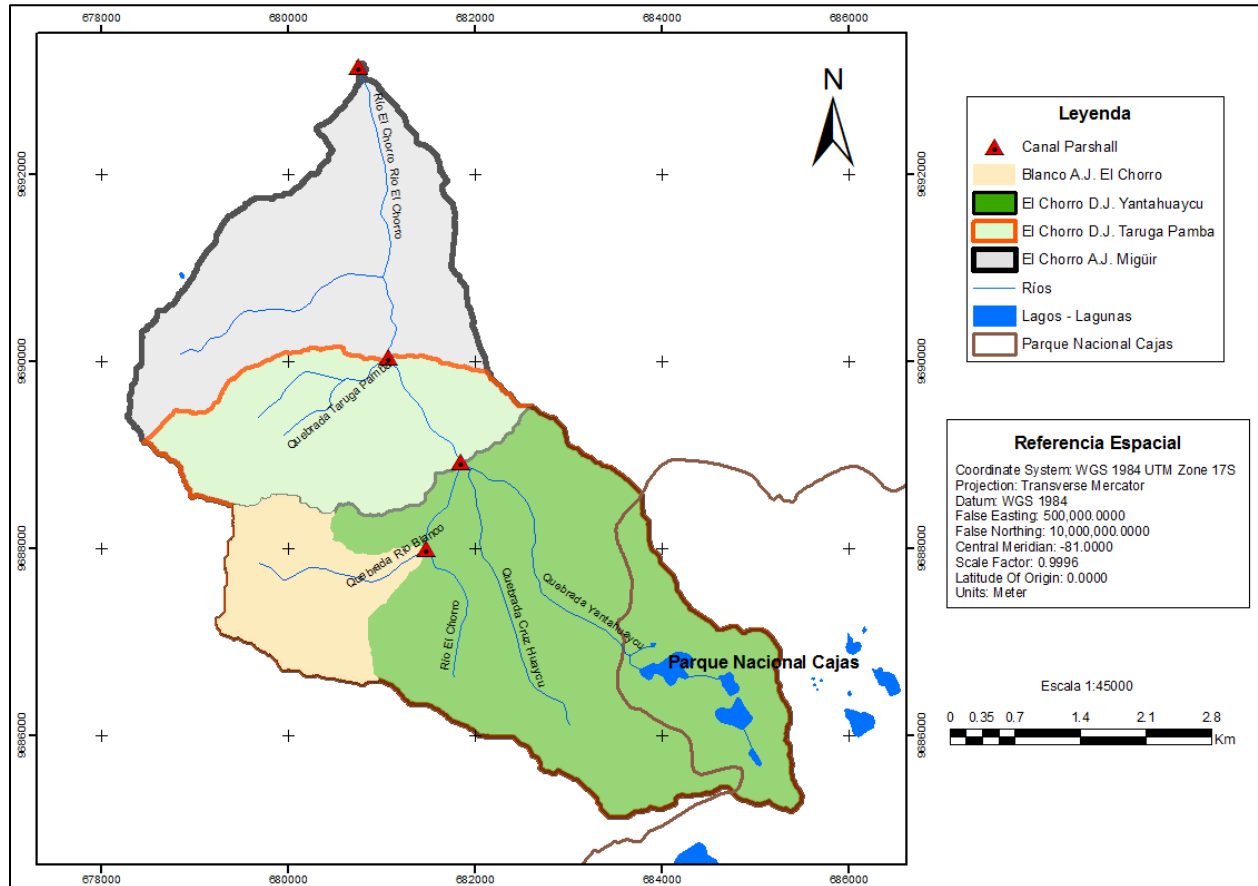


Figura 3.19 Delimitación de las microcuencas dentro de la región del río El Chorro donde estarán ubicadas las estructuras de control

3.7.2.2. Caudales de diseño

De la misma manera como lo calculado para toda la microcuenca de estudio (apartado 3.5.5), a continuación, se presenta el número de curva (Tabla 3.15), los hidrogramas obtenidos para cada microcuenca y los caudales picos resultantes, requeridos para el diseño de los canales Parshall.

Tabla 3.15 Cálculo del número de curva (NC) para las microcuencas donde estarán ubicados los canales. Se muestra la cobertura, su área de ocupación y el número de curva de cada cobertura

Cobertura		Área (Ha)	%	NC
Blanco A.J. El Chorro	Páramo (vegetación herbácea de altura)	254.2	94.59	58
	Erial (Afloramiento rocoso o zona erosionada)	9.0	3.35	82
	Área Poblada	5.5	2.06	82
NC ponderado				59.3
El Chorro D.J. Yantahuaycu	Páramo (vegetación herbácea de altura)	951.0	64.19	58
	Plantación Forestal (pino)	1.4	0.10	68
	Erial (Afloramiento rocoso o zona erosionada)	411.3	27.76	82
	Pastizal	85.1	5.82	72
	Área Poblada	8.8	0.60	82
	Cuerpo Agua	23.9	1.62	85
NC ponderado				66.0
El Chorro D.J. Taruga Pamba	Vegetación Herbácea	1.2	0.06	60
	Páramo (vegetación herbácea de altura)	1360.8	69.12	58
	Plantación Forestal (pino)	1.4	0.07	68
	Erial (Afloramiento rocoso o zona erosionada)	426.3	21.66	82
	Pastizal	145.8	7.41	72
	Área Poblada	9.1	0.46	82
NC ponderado				64.7

De acuerdo a la Tabla 3.15, la microcuenca del río Blanco está cubierta casi en su totalidad por páramo, dando como resultado un número de curva menor al resto de 59.3. Las otras dos microcuencas presentan características similares a las de toda la microcuenca de estudio y por lo tanto el número de curva es similar.

En la Figura 3.20 se presentan los hidrogramas obtenidos para cada microcuenca, originados por la misma precipitación efectiva de 1.2 mm y variando únicamente el NC, el área de drenaje y el caudal base. Para todos los casos, el caudal pico se genera a aproximadamente una hora después de iniciada la escorrentía directa. Para el caso de Blanco A.J. El Chorro, se produce únicamente un pico en el hidrograma y la recesión del flujo es constante. En cambio, para las otras dos microcuencas, el caudal vuelve a subir ligeramente a 1 hora 30 minutos para luego producirse la recesión completa del flujo.

En la Tabla 3.16 se resumen los caudales base asumidos para el evento de diseño, así como los caudales pico obtenidos para cada microcuenca mediante HEC-HMS. Se incluye también el obtenido para toda la microcuenca.

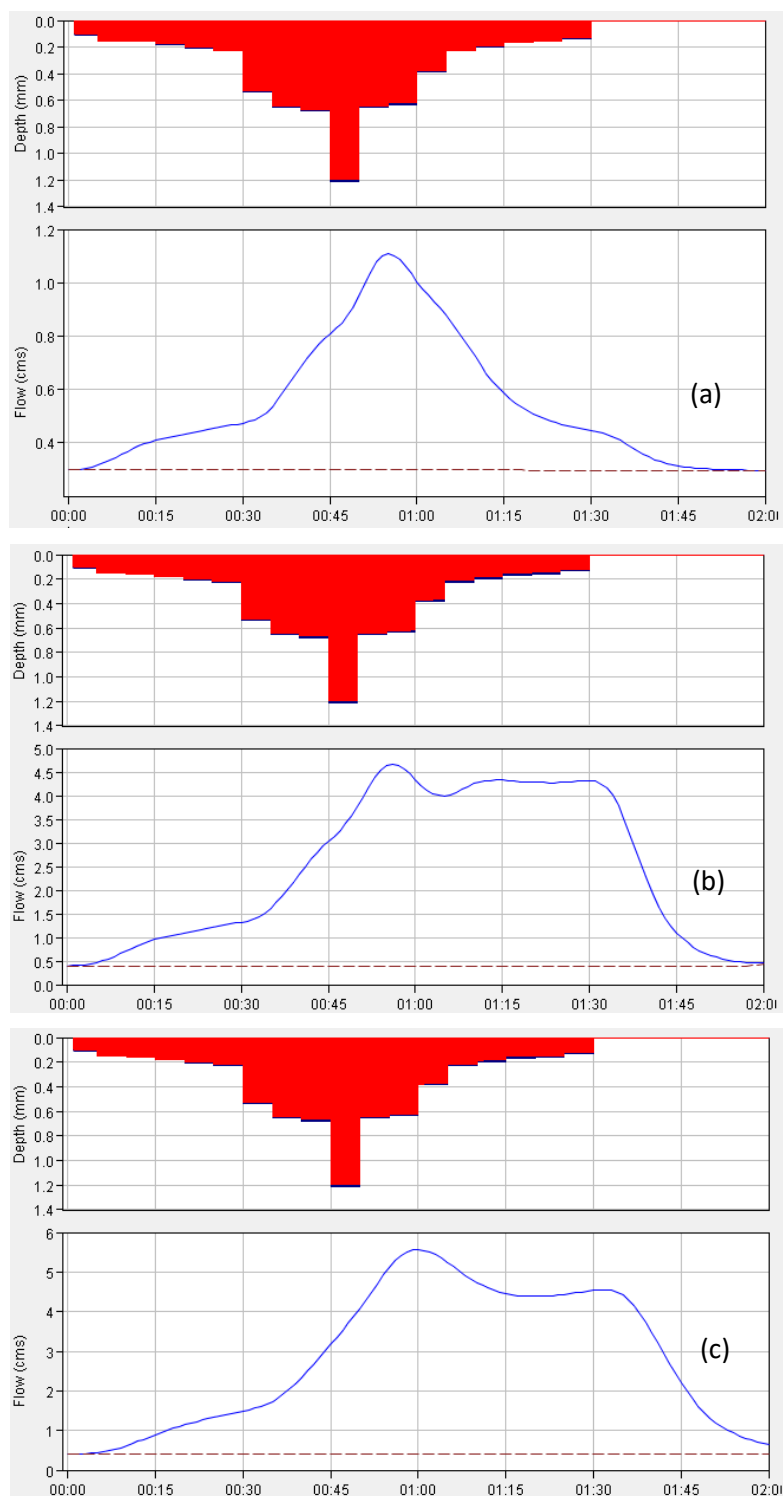


Figura 3.20 Hietograma de precipitación efectiva e hidrograma de crecida para el periodo de retorno de 25 años, en Blanco A.J. El Chorro (a), El Chorro D.J. Yantahuaycu (b) y El Chorro D.J. Taruga Pamba (c)

Tabla 3.16 Caudales base y de diseño para las microcuencas del río El Chorro

	Caudal base (m³/s)	Caudal pico (m³/s)
Blanco A.J. El Chorro	0.300	1.10
El Chorro D.J. Yantahuaycu	0.400	4.70
El Chorro D.J. Taruga Pamba	0.410	5.60
El Chorro A.J. Migüir	0.430	7.20

3.7.2.3. Diseño de canales Parshall

Con los caudales de diseño, se estableció la geometría de cada canal Parshall y su respectiva ecuación en función del nivel H_a , los cuales se muestran en la Tabla 3.17. Además, en la Figura 3.21 se presenta un esquema general de los canales diseñados.

Se puede apreciar que el ancho de la garganta de los canales varía desde 70 cm para Blanco A.J. El Chorro, 2.5 m para El Chorro D.J. Yantahuaycu, 2.7 m para El Chorro D.J. Taruga Pamba y 2.90 m para El Chorro A.J. Migüir. Por otro lado, el ancho del cauce requerido a la entrada del canal es de 2.0, 4.3, 4.6 y 4.9 m, respectivamente.

Estos valores fueron definidos en función del caudal; sin embargo, hay que considerar que estos canales deberán ser emplazados en zonas donde se puedan cumplir con estas dimensiones o bien ayudándose de técnicas constructivas. Para el emplazamiento se deberían tener en cuenta los siguientes criterios:

- Los canales deben estar en tramos rectos del cauce y en lugares estables para evitar que la estructura se debilite; para ello se pueden colocar obras de soporte.
- Deben ser construidos en zonas donde el caudal sea uniforme y no presente turbulencias.
- El lugar de emplazamiento debe ser de fácil acceso, tanto para la etapa de construcción como la de recopilación de información.
- Las orillas de los cauces deben ser altas para contener las crecidas.
- El medidor de nivel debe colocarse aguas arriba de la sección de control y en un sitio adecuado para evitar su deterioro. Además, se debe colocar un segundo punto de registro aguas abajo de la garganta.

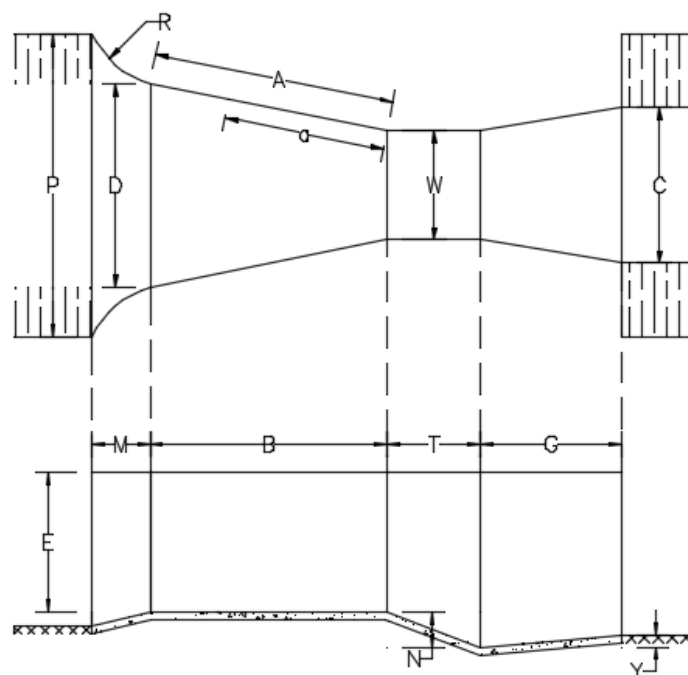


Figura 3.21 Esquema general del canal Parshall. Vista en planta (superior) y perfil (inferior)

Tabla 3.17 Geometría de los canales Parshall para cada microcuenca y su ecuación de calibración

Microcuenca	Ecuación	w	Dimensiones (m)														
			A	A	B	C	D	E	T	G	K	M	N	P	R	X	Y
El Chorro A.J. Migüir	$Q=7.126*Ha^{1.60}$	2.90	3.87	1.78	3.80	3.43	4.42	1.14	0.84	1.60	0.13	0.46	0.31	4.93	0.61	0.24	0.19
Blanco A.J. El Chorro	$Q=1.679*Ha^{1.56}$	0.71	1.57	1.05	1.54	1.02	1.33	0.91	0.61	0.91	0.08	0.38	0.23	1.98	0.51	0.05	0.08
El Chorro D.J. Yantahuaycu	$Q=6.346*Ha^{1.60}$	2.55	2.77	1.66	2.72	2.90	3.63	0.97	0.66	1.07	0.09	0.46	0.25	4.35	0.61	0.10	0.10
El Chorro D.J. Taruga Pamba	$Q=6.627*Ha^{1.60}$	2.67	3.17	1.70	3.11	3.09	3.92	1.03	0.73	1.26	0.10	0.46	0.27	4.56	0.61	0.15	0.13

3.7.3. Mapa de la red hidrometeorológica

El mapa resultante de la red hidrometeorológica se presenta en la Figura 3.22 y la información de la ubicación de las estaciones se presenta en las Tablas 3.17 y 3.18.

Tabla 3.18 Ubicación de las estaciones de monitoreo propuestas. Se muestran las coordenadas, el tipo de estación y resolución del equipo

Estación	Tipo	Resolución (mm)	Coordenadas		
			X (m)	Y (m)	Cota (ms.n.m.)
Yantahuaycu	CO	0.2	683816	9687058	4057
Chorro	CO	0.2	680525	9691501	2976
Río Blanco	PG	0.2	680242	9688139	3800
Cruz Huaycu	PG	0.2	682021	9687648	3654

Tabla 3.19 Ubicación de los canales Parshall

Estación	Coordenadas		
	X (m)	Y (m)	Cota (ms.n.m.)
Blanco A.J. El Chorro	681478	9688003	3532
El Chorro D.J. Yantahuaycu	681845	9688936	3240
El Chorro D.J. Taruga Pamba	681066	9690051	2960
El Chorro A.J. Migüir	680745	9693154	2185

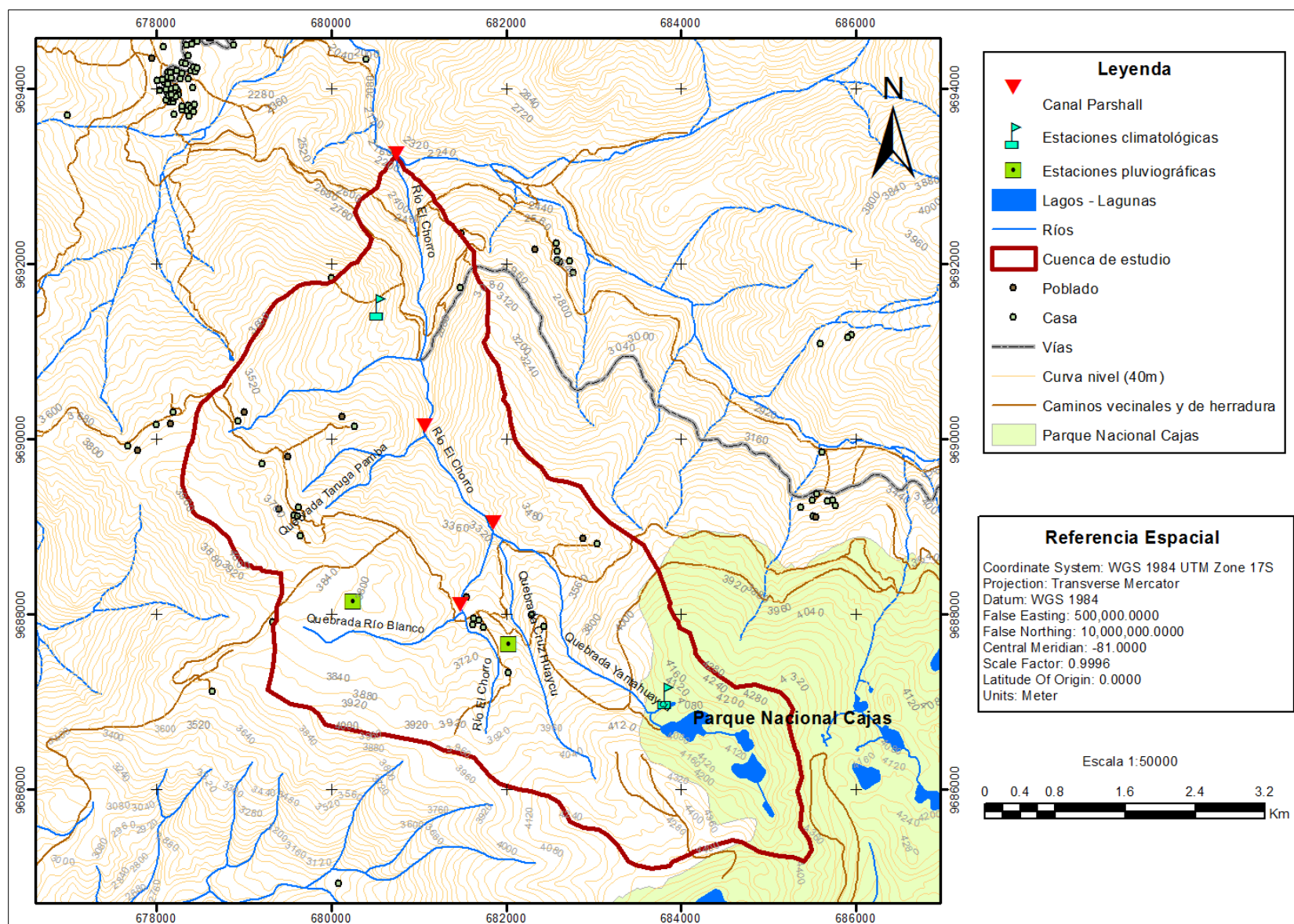


Figura 3.22 Mapa de la red hidrometeorológica para el monitoreo de la microcuenca del río El Chorro

3.7.4. Recomendación de equipos de medición

En la zona, las marcas de equipos más utilizados por las empresas ETAPA EP y PROMAS Universidad de Cuenca son Davis, Texas, Campbell Scientific y Onset. Sin embargo, existen otras marcas reconocidas como Global Water, Eco Environment y Schlumberger, entre otros. Para la red de monitoreo propuesta, se optaron por los siguientes equipos:

– Estación meteorológica Davis Vantage Pro2

Equipo fabricado por Davis. Consta de un pluviómetro de cubeta basculante automático, un conjunto de sensores integrados para registro de radiación solar, temperatura, humedad ambiente y del suelo, y un anemómetro y veleta para la medición de la velocidad y dirección del viento. El equipo requiere el software WeatherLink para la comunicación y descarga de la información a un ordenador. Adicionalmente, cuenta con paneles solares como fuente de energía para lugares sin acceso a corriente eléctrica. La resolución de medición de la lluvia es de 0.2 mm y tiene una precisión de $\pm 4\%$ para intensidades de hasta 50 mm/h. La resolución de medición de la temperatura es de 1 °C, con un rango de registros de -40 °C hasta 150 °C, y para la humedad relativa de 0 a 100%. Los datos meteorológicos son actualizados cada 2.5 segundos (Davis, 2016).



Figura 3.23 Estación meteorológica Davis

– Pluviógrafo HOBO RG3-M

Equipo fabricado por ONSET. Es de acero inoxidable y consta de dos componentes principales: un recolector de precipitación de cubeta basculante y data logger HOBO integrado en el pluviómetro. Puede registrar automáticamente hasta 3200 mm de datos de precipitaciones.

Opcionalmente, para la medición de temperatura se debe incluir un sensor. Los softwares compatibles son HOBOWare y HOBOWare Pro. La resolución de medición de la lluvia es de 0,2 mm y el rango de temperatura de almacenamiento es de -20° a $+70^{\circ}$ C. El data logger tiene una resolución de tiempo de 1.0 segundo. Además, el equipo cuenta con una batería de litio de 3V con una vida útil de un año (Onset, 2016).



Figura 3.24 Pluviógrafo HOBOWare

– **Sensor de presión de tubo ventilado PT2X**

Equipo fabricado por Inwusa (INW). Este sensor permite medir presión y temperatura y cuenta con un datalogger que almacena hasta 520000 registros. Incluye el software Aqua4Plus y Aqua4Plus Lite para transmisión de información. Posee dos baterías internas AA de 1.5V con una vida útil de 18 meses tomando registros cada 15 minutos (este tiempo depende de los factores ambientales). El equipo está construido en acero inoxidable permitiendo realizar lecturas de alta precisión en condiciones de campo rugosas y corrosivas. Tiene la posibilidad de recopilar datos en diferentes intervalos de tiempo. La resolución del registro de temperatura es de 0.1°C con un rango de medición de -15°C a 55°C . La resolución del registro de la presión es de 0.0034% FS (típico) con un rango de medición de la presión manométrica de 0.7 a 210 mH_2O y para la presión absoluta de 10 a 200 mH_2O .



Figura 3.25 Sensor de presión de tubo ventilado PT2X

Capítulo 4: Conclusiones y recomendaciones

- La microcuenca del río El Chorro se caracteriza por tener una precipitación poco variable de entre 1065 y 1080 mm anuales y una temperatura de 4 °C en la parte más baja y 15 °C en la parte más alta. La mayor variabilidad de la temperatura se debe a la gran diferencia altitudinal de 2200 m. Existe una cierta influencia del régimen occidental, pero mayormente de la zona de páramo por encontrarse muy cerca del Parque Nacional Cajas.
- A pesar de que la microcuenca es pequeña, el recurso hídrico presente es considerable con caudales medianamente uniformes en todo el año. La variación es baja debido a la gran capacidad de autorregulación y almacenamiento en las épocas de mayor y menor precipitación. Esto se evidencia en el caudal base alto de 300 l/s y el caudal medio de 370 l/s. Esto significa que la microcuenca siempre mantiene un flujo adecuado que puede ser utilizado aguas abajo para riego o incluso contribuir para el abastecimiento de agua potable de pequeñas comunidades. Sin embargo, el aprovechamiento hídrico requiere que se respete el mínimo necesario para la sobrevivencia de las demás especies, el cual es de 35 l/s según los resultados de esta investigación.
- Los caudales obtenidos para el diseño de los canales Parshall mediante el programa HEC-HMS no son elevados, tomando en cuenta que el periodo de retorno considerado es de 25 años. El caudal obtenido para la microcuenca del río El Chorro es de 7.2 m³/s y para la microcuenca del río Blanco, que es la de menor área, de 1.1 m³/s, lo cual concuerda con el comportamiento de las fuentes propias de la zona de páramo. Este rango de caudales sugirió el uso de canales Parshall, los cuales se adaptan adecuadamente y presentan pocas alteraciones en el medio. Esto es importante considerar debido a que la microcuenca de monitoreo es una zona frágil. Hay que tener en cuenta que el uso de programas computacionales requiere tener un conocimiento hidrológico previo para poder interpretar los resultados y obtener valores coherentes y confiables.

- La red hidrometeorológica propuesta para la microcuenca constituye un conjunto de estaciones y canales ubicados en puntos estratégicos que abarcan a toda el área, con fines investigativos a largo plazo. Sin embargo, esta red puede ser comprimida a una red mínima con menos estaciones, para obtener información general de la microcuenca. Los equipos planteados son los que más se han adaptado al medio por su disponibilidad y costo. La calidad de estos equipos debe ser garantizada para contar con información continua y por periodos de tiempo amplios, que caracterice el verdadero comportamiento de las variables hidrometeorológicas.
- El estudiar una microcuenca sin información requiere de una recopilación adecuada de datos de zonas que tengan un comportamiento similar. El control de calidad de dicha información constituye un paso preliminar básico para obtener resultados confiables, tomando en cuenta que de por sí existen muchas incertidumbres. No se requiere aplicar procedimientos rigurosos o complicados para obtener datos representativos y válidos para otros estudios, pero sí de experiencia y de un buen sentido común. A pesar de ello, la limitada información con la que se contó en esta investigación sugiere que los resultados sean contrastados en posteriores estudios, realizando nuevos aforos o ya con los datos recopilados si se construye la red propuesta. Además, se recomienda considerar otras variables como la humedad, viento y evapotranspiración, las cuales influyen también en el comportamiento hidrológico de las fuentes.
- La implementación de esta red contribuirá al monitoreo de otras microcuencas que han sido relegadas por las autoridades locales, debido principalmente a que sus aguas no drenan hacia la zona de aprovechamiento hídrico del Azuay, sino al océano Pacífico. Pero además, la microcuenca del río El Chorro constituye actualmente una zona de gran importancia, debido a que dentro de ella se encuentra el área de explotación minera Río Blanco. Tomando en cuenta que se localiza muy cerca al Parque Nacional Cajas, es indiscutible la influencia que tendría sobre esta zona protegida. Es por ello que se espera que esta red sea implementada en el futuro y puedan monitorearse los posibles cambios que esta acción produzca en la zona. Sin embargo, para que la red sea efectiva, se recomienda el mantenimiento y operación de los equipos, para la detección oportuna de desperfectos y evitar que se generen registros erróneos de la información. Además, se recomienda complementar con una vigilancia del uso de suelo en las



zonas de páramo, ya que la degradación de las mismas afecta en la respuesta hidrológica de las microcuencas y destruye el hábitat de ciertas especies.

- La red de investigación propuesta, en un futuro podrá formar parte de las redes existentes, para contribuir en la generación de información en zonas no monitoreadas y a su vez crear una base de datos segura y confiable. Esta información podría ser usada en futuras investigaciones y considerarla para la planificación, desarrollo y evaluación de proyectos, de manera que se dé un adecuado manejo de los recursos hídricos. La microcuenca de estudio al igual que todas las microcuencas de páramo deben ser cuidadas por ser altamente frágiles y constituir una gran fuente de agua limpia, algo que se está perdiendo en los últimos años.



Referencias Bibliográficas

- Aguilera, M. (2007). *Estimación de funciones de distribución de probabilidad, para caudales máximos, en la región del Maule*. Universidad de Talca, Chile.
- Aguirre, N. (2007). Manual para el manejo sustentable de cuencas hidrográficas.
- Aparicio, F. J. (1999). *Fundamentos de hidrología de superficie* (8.^a ed.). Mexico: Limusa Noriega.
- Balslev, H., & Luteyn, J. L. (Eds.). (1992). *Páramo: an Andean ecosystem under human influence*. London ; San Diego: Academic Press.
- Buytaert, W. (2004). *The properties of the soils of the south Ecuadorian páramo and the impact of land use changes on their hydrology*. Ph.D. thesis. Faculty of Agricultural and Applied Biological Sciences, Katholieke Universiteit Leuven.
- Buytaert, W., & Beven, K. (2009). Regionalization as a learning process. *Water Resources Research*, 45(11). <https://doi.org/10.1029/2008WR007359>
- Buytaert, W., Célleri, R., Bièvre, B. de, Deckers, J., & Wyseure, G. (2003). Modelando el comportamiento hidrológico de microcuencas de páramo en el Sur del Ecuador con TOPMODEL. *Revista Marginalia*, 6, 149-157.
- Buytaert, W., Célleri, R., De Bièvre, B., & Cisneros, F. (2010). Hidrología del páramo andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad. *Descargado de ftp://ftp.ciat.cgiar.org/.../HIDROLOGIA_DEL_PARAMO en octubre*.
- Campos, D. (1992). *Procesos del ciclo hidrológico*. México: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Célleri, R., De Bièvre, B., Ochoa, B., & Villacis, M. (2013). Guía metodológica para el monitoreo hidrológico de ecosistemas Andinos. *Iniciativa iMHEA*.
- Chow, V. T., Maidment, D., & Mays, L. (2000). *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Cisneros, F., & Coello, C. (2009). Análisis de curvas de duración general para determinar el grado de degradación de cuencas hidrográficas. *Revista Anales Universidad de Cuenca*, 55, 71-76.
- Clavijo, H., & Peñaherrera, C. (2013). *Diseño de una red de estaciones meteorológicas e hidrológicas para previsión de crecidas e inundaciones, en las subcuencas de los ríos Chone, Portoviejo, Bulu-Bulu y Chongón*. Escuela Politécnica Nacional.
- Coello, C. (2015). Análisis de Vulnerabilidad a eventos de crecida y diseño de obras físicas para la protección de márgenes en infraestructura del río Tarqui. ETAPA EP- SENAGUA.



Coello, C. (2016). *Hidrometría*. Cuenca.

Cordero, D. (2008). Esquemas de pagos por servicios ambientales para la conservación de cuencas hidrográficas en el Ecuador. *Investigación Agraria: Sistemas y recursos forestales*, 17, 54-66.

Crespo, P., Célleri, R., Buytaert, W., Ochoa, B., Cárdenas, I., Iñiguez, V., ... De Bièvre, B. (2014). Impactos del cambio de uso de la tierra sobre la hidrología de los páramos húmedos andinos. *Avances En Investigación Para La Conservación de Los Páramos Andinos. CONDESAN*, 288-304.

Crespo, P., Feyen, J., Buytaert, W., Célleri, R., Frede, H.-G., Ramírez, M., & Breuer, L. (2012). Development of a conceptual model of the hydrologic response of tropical Andean micro-catchments in Southern Ecuador. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 9(2), 2475-2510.

CRQ, C. A. R. de Q., & CIDERA, U. de Q.-G. de investigación. (2011). Estimación de caudales ecológicos mediante métodos hidrológicos e hidráulicos en la UMC río Quindío. Recuperado a partir de https://www.crq.gov.co/Documentos/Estimacion_Caudales_Ecologicos_UMC_Rio_Quindio.pdf

Cuesta, F., Sevink, J., Llambí, L., De Bièvre, B., & Posner, J. (2014). Avances en investigación para la conservación de los páramos andinos. *CONDESAN. Quito, Ecuador*.

Davis. (2016). Vantage Pro2 Plus Station. Recuperado a partir de <http://www.alphaomega-electronics.com/img/cms/pdf/Davis/Estaciones-Meteorologicas/VantagePro2-Pro2Plus/VantagePro2&Pro2Plus-Wireless-Stations.pdf>

Dercon, G., Bossuyt, B., Bièvre, B., Cisneros, F., & Deckers, J. (1998). *Zonificación agroecológica del austro ecuatoriano*. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Programa para el Manejo del Agua y del Suelo.

Estrella, D. (2016). *Determinación de curvas de frecuencia y zonificación de intensidades en la cuenca media alta del río Paute*. Universidad de Cuenca.

F. Javier, S. (2016). Hidrología Superficial (III): Relación Precipitación-Escorrentía. Dto. Geología de la Universidad de Salamanca. Recuperado a partir de http://hidrologia.usal.es/temas/Hid_sup_3.pdf

FAO (Ed.). (2006). *World reference base for soil resources, 2006: a framework for international classification, correlation, and communication* (2006 ed). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

FAO (2017). Información básica | Conjunto de herramientas GFS | Gestión de cuenca hidrográficas. Recuperado 3 de octubre de 2017, a partir de <http://www.fao.org/sustainable-forest-management/toolbox/modules/watershed-management/basic-knowledge/es/>



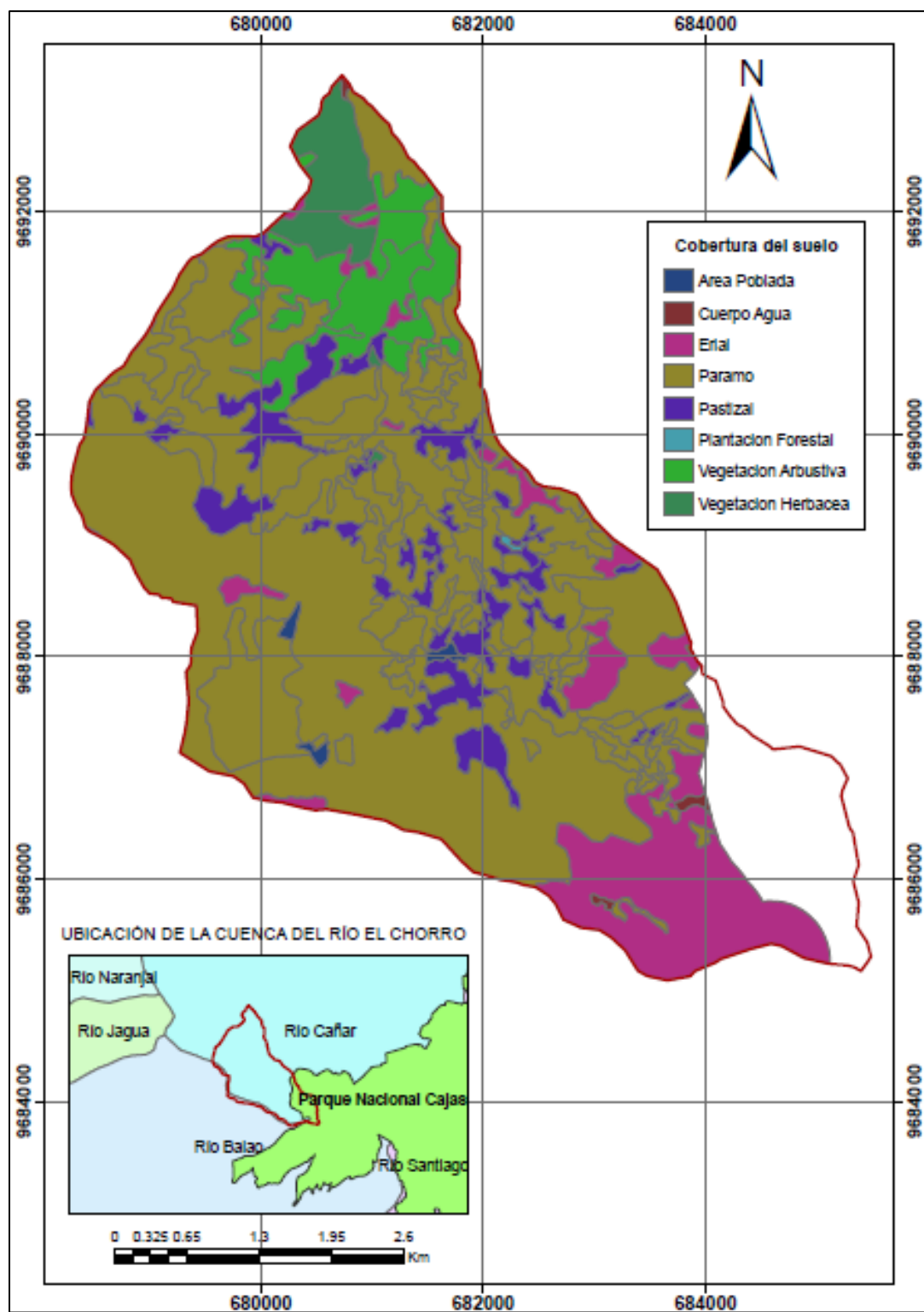
- Fattorelli, S., & Fernández, P. C. (2011). *Diseño Hidrológico* (2.^a ed.).
- Fuentes, J. (2004). Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del Parque Nacional Pico de Tancitaro.
- Gil, G. (2012). Páramos: potencia vulnerable en las alturas. CAMBIUM. *Boletín Informativo del Centro de Investigación en Ecosistemas y Cambio Climático. Carbono y Bosques–C&B*, 9(1), 6-12.
- Ibáñez, A. (2011). *Análisis estadístico de valores extremos y aplicaciones*. Universidad de Granada, Granada. Recuperado a partir de <http://masteres.ugr.es/moea/pages/tfm1011/analisisestadisticodevaloresextremosyaplicaciones/>!
- IMTA. (1988). Manual de diseño de estructuras de aforo. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- INAMHI. (2015a). Anuario meteorológico 2012.
- INAMHI. (2015b). *V Foro Climático Nacional 2015. La Troncal. Situación meteorológica*. Recuperado a partir de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/wp-content/ForosClimaticos/Foros%20Nacionales/2015/V%20Foro/Situacion%20meteorologica%20nacional-%20Ing.%20Gonzalo%20Ontaneda-%20Inamhi.pdf>
- Lancaster University. (2017). Professor Keith Beven. Recuperado a partir de [http://www.research.lancs.ac.uk/portal/en/people/keith-beven\(daab6f29-9a24-4b75-9f34-333bbc05bf1d\).html](http://www.research.lancs.ac.uk/portal/en/people/keith-beven(daab6f29-9a24-4b75-9f34-333bbc05bf1d).html)
- Londoño, C. (2001). Cuencas Hidrográficas. Bases Conceptuales-Characterización-Planificación-Administración. Universidad de Tolima, Ibagué.
- López, R. (2001). Consideraciones acerca de los límites de la aplicación del método del Número de Curva del Soil Conservation Service, 92-97.
- Lux, M. (2010). *Medidores de flujo en canales abiertos*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Ministerio del Ambiente. (2017). Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador. Recuperado a partir de <http://areasprotegidas.ambiente.gob.ec/es>
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2003). *Applied statistics and probability for engineers* (3rd ed). New York: Wiley.
- OMM. (2011). *Guía de prácticas hidrológicas*. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial.
- OMM, & UNESCO. (2013). *International glossary of hydrology*.



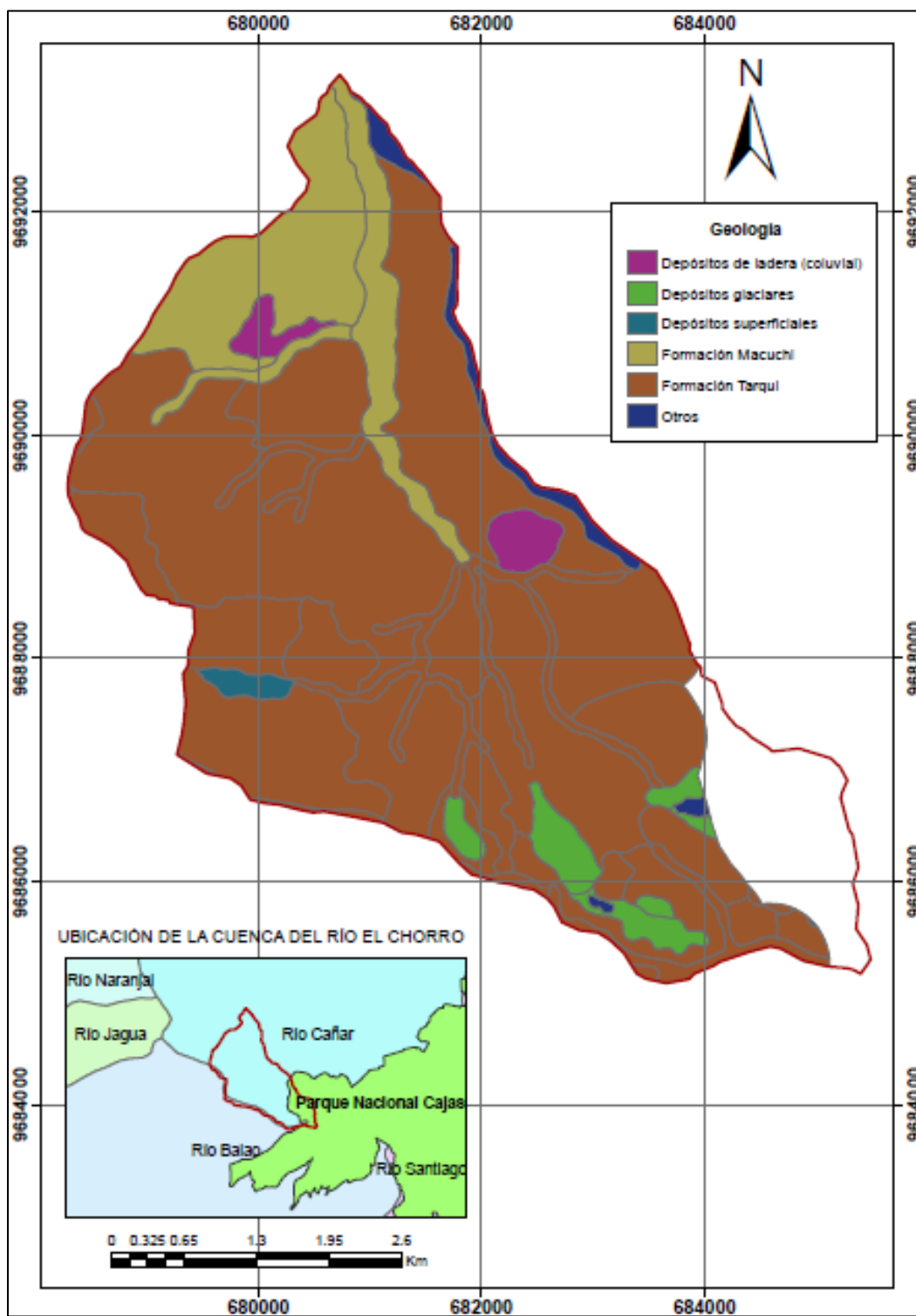
- Onset. (2016). HOBO Data Logging Rain Gauge (RG3 and RG3-M) Manual. Recuperado a partir de http://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/10241-J%20MAN-RG3%20and%20RG3-M.pdf
- Ortiz, R. (2011). *Pequeñas centrales hidroeléctricas* (1.^a ed.). Bogotá: Ediciones de la U.
- Quichimbo, P., Tenorio, G., Borja, P., Cárdenas, I., Crespo, P., & Célleri, R. (2012). Efectos sobre las propiedades físicas y químicas de los suelos por el cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: páramo de Quimsacocha al sur del Ecuador. *Suelos Ecuatoriales*, 42(2), 138-153.
- Rocha, A. (2011). El Agua Virtual y la Huella Hídrica en el siglo XXI. Perú.
- Sandoval, W., & Aguilera, E. (2015). Determinación de caudales en cuencas con poca información hidrológica. *Ciencia Unemi*, 7(12), 100-110.
- Seo, S. (2006). *A Review and Comparison of Methods for Detecting Outliers in Univariate Data Sets*. University of Pittsburgh.
- Soil Survey Staff. (2003). *Keys to Soil Taxonomy* (Ninth Edition). United States Department of Agriculture.
- Tapia, J. (2016). *Estructura de la precipitación y su variabilidad espacio-temporal a lo largo de una gradiente altitudinal*. Universidad de Cuenca.
- Villacrés, C. A., & Gallegos, S. D. (2010). *Estudio de la evaluación de la red hidrometeorológica en la región Nor-Oriental del Ecuador y propuesta de su optimización como parte de la red hidrometeorológica básica del Ecuador*. Escuela Politécnica Nacional.

Anexos

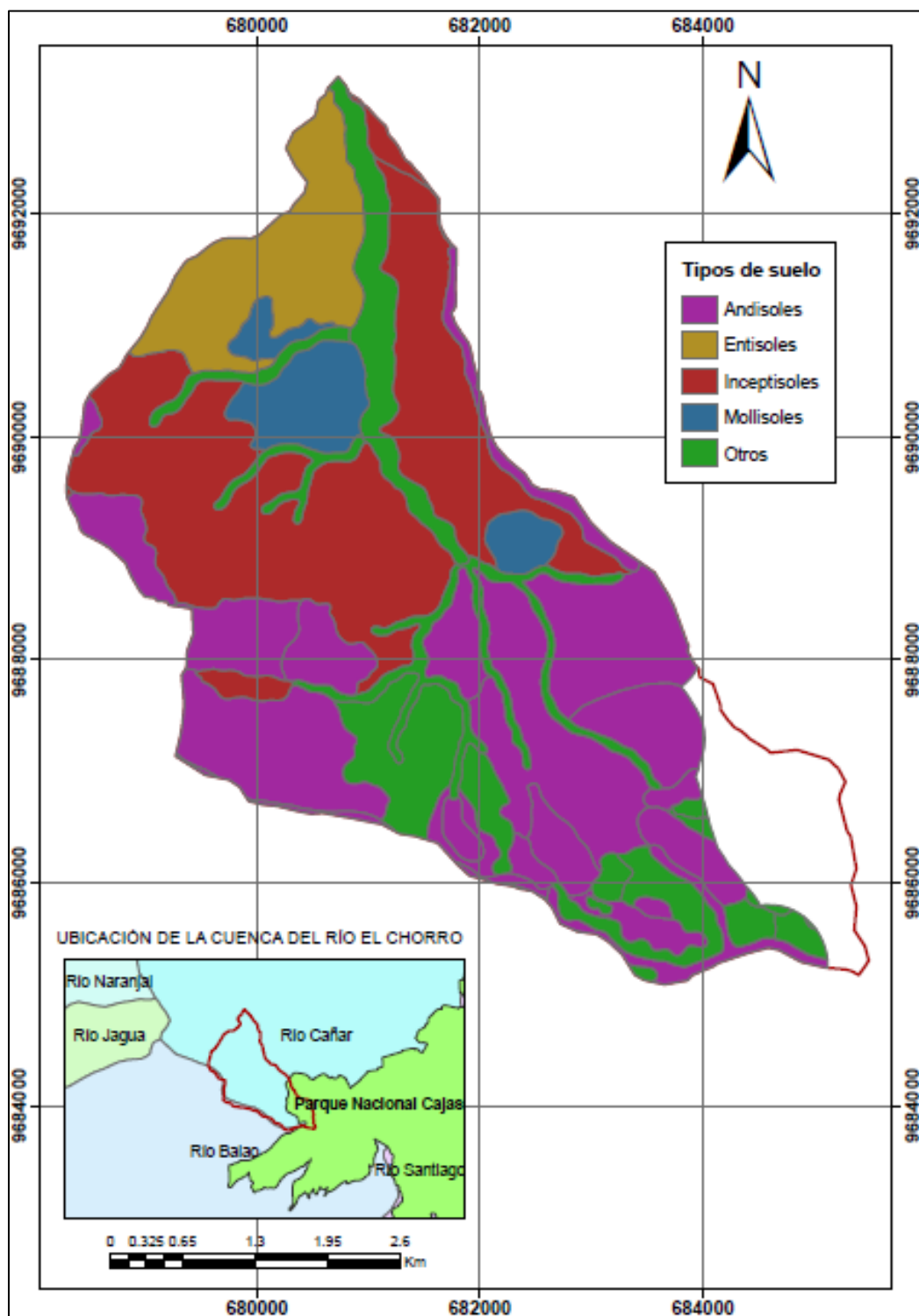
Anexo 2.1 Mapa de la cobertura del suelo en la microcuenca del río El Chorro



Anexo 2.2 Mapa de la geología de la microcuenca del río El Chorro



Anexo 2.3 Mapa de los tipos de suelo en la microcuenca del río El Chorro





Anexo 2.4 Precipitaciones anuales de las estaciones meteorológicas del INAMHI en el periodo 1958-2012 (mm)

Año	Santa Isabel	Naranjal	Girón	Hacienda Santa Lucía	Pedernales	San Fernando INECEL	Año	Santa Isabel	Naranjal	Girón	Hacienda Santa Lucía	San Fernando INECEL
1958							1986	480	302	519.8		1211.9
1959	432.1		844.7				1987	289	619.3	557.7	222.4	1097.5
1960	422.2		786.3				1988			744.2		1411.6
1961			655.2				1989			843.6		1353.6
1962	507.8		803.2				1990		198.7	637.8	356.7	1075.2
1963	620.9		711.9				1991			576.3		
1964	258.6		535.4				1992		496.5		350.5	
1965	415.3	2056.6	784.9				1993		396.6	1085.6		
1966		1098.7	522.9				1994			816.3	446	
1967	295.5		545.7				1995		228.4	561.4	305.6	
1968	213.8		584.2	172.4			1996		238.1	843.1	583.6	
1969	516.3	1155.3	954.9	520.9			1997		925.9	921.4	577.1	
1970	494.5	568.8	898.4	408.4			1998			610.2	818.4	
1971	672.7	811.5	1102.5	481.6			1999		532.5	1115.1	680.1	
1972	559.9		850.7	430.5			2000			815.5		
1973	688.8	1496.1	949.2	483			2001					
1974	509.8		836.5	394.4			2002		596.1		219.8	
1975	637		997.9				2003		393.3		268.8	
1976	611.9		914.2				2004		351.4	740.5		
1977	484.4			398.8	894.8		2005			639.9		
1978	353.2		621.1	327.4			2006		394	937.5	539.4	
1979		249.6	673.1	330.1			2007				496.1	
1980	349.4		740.9		1009.1		2008			1085.2	704.1	
1981	449	289.7	676				2009	609.9	420.4		487.1	
1982		301.6	939.5		1144.9	1900.7	2010	618.4	633.5		374.7	
1983	659.5	1013.8	1116.3	531.3	1079.9	1829.3	2011	602.4		1149	454.8	
1984	670.4		827.3	661.6	1246.9	1672.7	2012		667.5	1521.6	603.6	
1985	294.7		588	239.7		965.6						



Anexo 2.5 Precipitaciones anuales de las estaciones meteorológicas de ETAPA-EP y PROMAS Universidad de Cuenca en el periodo 1998-2016 (mm)

Año	Chanlud	Chirimichay	Labrado	Portete	Yanuncay en Cancán	Yanuncay en Pucán	Bermejós	Marianza Alto Pajonal 2	Quimsacocha	Zhurucay
1998				1100.5	910	1136.5				
1999				1458	1231	1440				
2000				1005	1042.5	1284				
2001				1065	781	842.5				
2002	1332		1211.5	1022	716	683				
2003	1427.5		1103	918.5	726.5	780.5				
2004	1489.5		1331.5	1086.5	762.5					
2005	1482		1281	1021	859.5	640.5		1033.018		
2006	1482		1431.5	1345.5	769.5	866.5			704.06228	
2007	1737		1498	1053.5	776.5	952.5		1184.144	987.9948	1237.4
2008	1839.5		1791	1287	1215	1092	1278.8	1334.262	1231.88	1480.8
2009	1421		1258.5	869	809.5	849.5		976.376	891.91	
2010	1365	1261.5	1249.5	1085.5	978.5	1044.5			791.648	
2011	1817.5	1709.5	1776	1479	1122.5	1296.5	1326.8		1099.2504	
2012	1413.5	1404	1413.5	1241.5	1061	1043	1173.8	1266	1131.184	1204.4
2013	1335	1118.5	1185.5		820	852.5	964.4	1146.2	953.556	
2014	1506.5	1296.5	1377.5	1279.5		1135.5	1037.4	1387.2	868.196	1088
2015		1197						1154.6	844.8	1161.2
2016							942.8	1081		



Anexo 2.6 Precipitaciones máximas 24 horas de las 13 estaciones meteorológicas para la identificación de outliers (mm)

Estaciones INAMHI				Estaciones ETAPA-EP y PROMAS Universidad de Cuenca									
Año	Naranjal	Girón	Hacienda Santa Lucía	Año	Chanlud	Chirimichay	Labrado	Portete	Yanuncay en Cancán	Bermejós	Marianza Alto Pajonal 2	Quimsacocha	Zhurucay
1990	19.3	39.4	61	1997					31				
1991		30.7		1998				36.5	22				
1992	18.8		30.8	1999				29.5	21.5				
1993	16	51.2		2000				26.5	21				
1994				2001			21	51	20.5				
1995	30	61.6	22.5	2002	21.5		20	41	24.5				
1996	18.3			2003	36.5		33	36.5	27.5				
1997	29.4	40.4	32	2004	36		32	50.5	22.5				
1998			55.2	2005	33		33	41.5	25		25.91		
1999	24.6		50.5	2006	35.5		32	38.5	27.5		26.42	22.4	
2000				2007	45		32	31	22.5	25.6	25.40	27.2	29.4
2001				2008	30.5		27.5	28.5	20.5	26.4	22.10	33.23	42.6
2002	25.2		22.3	2009	33		27	31.5	24.5		28.70	45.6	28.4
2003	16.4		27.3	2010	25	38	30.5	40.5	28	23.2	34.54	22	
2004		88.6		2011	34	38.5	32	47	24	23	33.00	22.4	31.8
2005		46.6		2012	23.5	39	31	62	27	22.6	30.00	27.6	32.6
2006			39.9	2013	29	26	21.5	24	28.5	31.8	35.40	22.4	
2007			47.8	2014	24	28	28	69		21.4	50.40	31.8	29.8
2008		50.8	30.8	2015	29.5	30.5		35			35.80	22	28.6
2009	15.9		23.5	2016						39.8	21.40		32.2
2010			17.7										
2011			21.1										
2012		80.6											

Anexo 2.7 Valores de D_α para distintos niveles de significancia (α) y tamaño de la muestra (n)

Prueba de Smirnov-Kolmogorov. Valores críticos $D_{\max}(\alpha, n)$					
Tamaño de la muestra	Nivel de significancia α				
	.20	.15	0.10	0.05	0.01
1	.900	.925	.950	.875	.995
2	.684	.726	.776	.842	.929
3	.565	.597	.642	.708	.828
4	.494	.525	.564	.624	.733
5	.446	.474	.510	.565	.669
6	.410	.436	.470	.521	.618
7	.381	.405	.438	.486	.577
8	.358	.381	.411	.457	.543
9	.339	.360	.388	.432	.514
10	.322	.342	.368	.410	.490
11	.307	.326	.352	.391	.468
12	.295	.313	.338	.375	.450
13	.284	.302	.325	.361	.433
14	.274	.292	.314	.349	.418
15	.266	.283	.304	.338	.404
16	.258	.274	.295	.328	.392
17	.250	.266	.286	.318	.381
18	.244	.259	.278	.309	.371
19	.237	.252	.272	.301	.363
20	.231	.246	.264	.294	.356
25	.210	.220	.240	.270	.320
30	.190	.200	.220	.240	.290
35	.18	.190	.201	.230	.270
≥ 35	$1.07/\sqrt{N}$	$1.14/\sqrt{N}$	$1.22/\sqrt{N}$	$1.36/\sqrt{N}$	$1.63/\sqrt{N}$

Fuente: (Aguilera, 2007)

Anexo 2.8 Valores del NC para diferentes coberturas del suelo asumidas en otras microcuencas de páramo

% de Área y cálculo del Numero de Curva CN (CHII)							
Cuenca	Paramo	Bosque Natural y vegetación nativa	Vegetación introducida	Cultivos y Pasto	Cuerpos de Agua	Suelo descubierto, centros poblados /o vías	CN Ponderado
CN	58	60	68	72	85	82	
Tarqui	0.25	0.219	0.033	0.42	0.0114	0.067	66.6
Shucay	0.24	0.259	0.049	0.38	0.0003	0.072	66.0
San Agustín	0.04	0.155	0.080	0.59	0.00001	0.130	70.6
Chapar		0.331	0.068	0.53		0.069	68.5
Cumbe	0.21	0.164	0.051	0.57	0.0004	0.078	72.9
Narancay	0.0004	0.494	0.068	0.41		0.022	65.9
El Salado		0.122	0.064	0.52		0.293	73.2
Tres Marías	0.00011	0.123	0.160	0.57		0.151	71.4

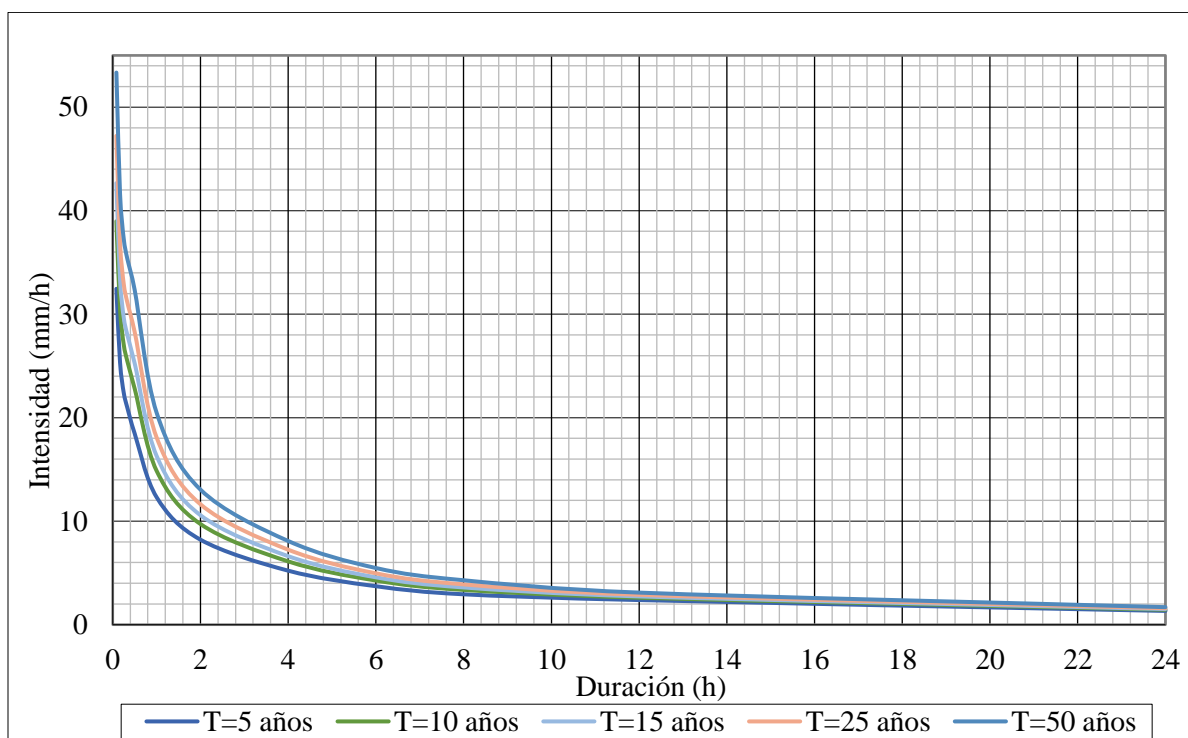
Fuente: (Coello, 2015)

Anexo 3.1 Clasificación de las microcuencas hidrográficas según el área.

Tamaño de la cuenca (km ²)	Descripción
< 25	muy pequeña
25 a 250	pequeña
250 a 500	intermedia-pequeña
500 a 2500	intermedia-grande
2500 a 5000	grande
> 5000	muy grande

Fuente: (Campos, 1992)

Anexo 3.2 Curvas IDF para periodos de retorno de 5, 10, 15, 25 y 50 años de la estación Labrado. Se muestran las intensidades para 24 horas de duración.



Anexo 3.3 Hietograma de lluvia máxima de 1.5 horas de duración, cada 5 minutos, para un periodo de retorno de 25 años, de la estación Labrado

Tiempo (min)	Intensidad (mm/h)	Prec acum (mm)	Prec c/5 min (mm)	Hietograma (mm)
5	47.2	3.93	3.93	0.35
10	36.8	6.13	2.20	0.50
15	33	8.25	2.12	0.52
20	31.1	10.37	2.12	0.58
25	29.8	12.42	2.05	0.67
30	28.3	14.15	1.73	0.73
35	26.4	15.40	1.25	1.73
40	24.2	16.13	0.73	2.12
45	22.2	16.65	0.52	2.20
50	20.6	17.17	0.52	3.93
55	19.2	17.60	0.43	2.12
60	18.1	18.10	0.50	2.05
65	17.2	18.63	0.53	1.25
70	16.6	19.37	0.73	0.73
75	16	20.00	0.63	0.63
80	15.5	20.67	0.67	0.53
85	15	21.25	0.58	0.52
90	14.4	21.60	0.35	0.43
Total			21.60	

